

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

для проведення практичних та лабораторних занять, виконання розрахунково–
графічного завдання та самостійної роботи з дисципліни

«ГІДРАВЛІКА»

*(для студентів 1–2 курсів денної та заочної форм навчання спеціальності
263 – Цивільна безпека освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»
та спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія освітньо-
кваліфікаційного рівня «спеціаліст»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2019

Методичні рекомендації для проведення практичних та лабораторних занять, виконання розрахунково-графічного завдання та самостійної роботи з дисципліни «Гідравліка» (для студентів 1–2 курсів денної та заочної форм навчання спеціальності 263 – Цивільна безпека освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» та спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія освітньо-кваліфікаційного рівня «спеціаліст») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Т. О. Шевченко. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 100 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. Т. О. Шевченко

Рецензент

І. М. Чуб, кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення і очищення вод, протокол № 1 від 29 серпня 2016 р.

ЗМІСТ

1 Практичні заняття.....	4
1.1 Фізичні властивості рідин і газів.....	4
1.1.1 Питома маса і питома вага.....	4
1.1.2 Стисливість, температурне розширення і пружність рідин та газів.....	5
1.1.3 В'язкість.....	6
1.2 Основне рівняння рівноваги рідини під дією сил ваги.....	8
1.2.1 Геометричне і фізичне тлумачення основного рівняння гідростатики.....	9
1.3 Визначення сили тиску на плоскі стінки і дно посудини.....	10
1.4 Визначення сили тиску на криволінійні поверхні.....	13
1.5 Закон Архімеда та елементи теорії плавучості.....	15
1.6 Види руху рідини.....	20
1.7 Лінії та трубки течії.....	21
1.8 Гідравлічні характеристики потоку рідини.....	21
1.9 Рівняння Д. Бернуллі.....	22
1.10 Режими руху рідини.....	23
1.11 Втрати напору за довжиною.....	25
1.12 Місцеві втрати напору у трубах.....	31
2 Розрахунково–графічне завдання.....	42
3 Лабораторні роботи.....	53
Лабораторна робота № 1.....	53
Лабораторна робота № 2.....	59
Лабораторна робота № 3.....	65
Лабораторна робота № 4.....	72
Лабораторна робота № 5.....	80
4 Самостійне вивчення дисципліни.....	86
Список використаних джерел.....	92
Додатки.....	93

1 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

1.1 Фізичні властивості рідин і газів

Технічна механіка рідини та газу або гідравліка – це наука, яка вивчає закони рівноваги та руху рідини, розробляє методи пристосування їх для практичних розрахунків.

Рідиною називають тіло з надзвичайно великою рухливістю своїх часток одна відносно одної, яке не може перебувати в стані рівноваги при дії на нього дотичних напружень.

Фізичні властивості рідини газів проявляються в особливостях їх поведінки в тих чи інших умовах. Вони лежать в основі багатьох законів і формул гідравліки.

1.1.1 Питома маса і питома вага

Нехай рідина масою M займає об'єм W . Тоді відношення:

$$\rho = \frac{M}{W}, \text{ кг/м}^3 \quad (1.1)$$

є величиною, яка характеризує речовину рідини, яку будемо називати питомою масою рідини. Одиниця питомої маси – кілограм на кубічний метр (кг/м^3). Наприклад, питома маса прісної води при 4°C становить $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Якщо однорідна рідина займає об'єм W , а вага рідини в цьому об'ємі G , то під питомою вагою рідини розуміють відношення:

$$\gamma = \frac{G}{W}, \text{ Н/м}^3 \quad (1.2)$$

Одиниця питомої ваги – ньютон на кубічний метр (Н/м^3). Наприклад, питома вага прісної води при 4°C становить $\gamma = 9810 \text{ Н/м}^3$.

Питома маса рідини залежить від температури. Для температури t питому масу можна визначити за формулою:

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta_t \cdot t}, \text{ кг/м}^3 \quad (1.3)$$

де ρ_0 – питома маса рідини при 0°C ;
 β_t – коефіцієнт температурного розширення рідини.

Питома маса досконалих (ідеальних) газів визначається характеристичним рівнянням Клапейрона – Менделєєва

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}, \text{ кг/м}^3 \quad (1.4)$$

де R – питома газова стала, Дж/(кгК) ;
 p – абсолютний тиск, Па ;
 T – абсолютна температура, К .

Питома маса газу, як це видно з рівняння (1.4), істотно зменшується зі зростанням температури і зменшується пропорційно зростанню тиску при незмінній температурі.

Питома маса повітря при стандартних умовах ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$); $p = 101325\text{ Па}$ і $R = 287\text{ Дж/кг К}$) дорівнює – $1,2\text{ кг/м}^3$.

На основі другого закону Ньютона між питомою масою і питомою вагою існує зв'язок:

$$\gamma = \rho \cdot g, \text{ Н/м}^3 \quad (1.5)$$

Залежність питомої маси (щільності) від температури наведено у додатку А.

Приклад. 5 л нафти важать 41,7 Н. Потрібно визначити питому масу і питому вагу.

Розв'язання. Переводимо об'єм в літрах у кубічні метри $W = 5\text{ л} = 5 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$. Питома вага за формулою (1.2) становитиме:

$$\gamma = \frac{41,7}{5 \cdot 10^{-3}} = 8340\text{ Н/м}^3.$$

Питому масу знайдемо за формулою (1.5)

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{8340}{9,81} = 850,15\text{ кг/м}^3.$$

1.1.2 Стисливість, температурне розширення і пружність рідин та газів

Стисливість – це здатність рідин змінювати свій об'єм при зміні тиску. Мірою стисливості рідин служить коефіцієнт об'ємного стиснення β_p , що являє собою відносне зменшення об'єму W при підвищенні на одиницю тиску p :

$$\beta_p = -\frac{dW}{W \cdot dp}, \text{ Па}^{-1} \quad (1.6)$$

Знак мінус у формулі (1.6) означає, що при збільшенні тиску об'єм зменшується. Якщо вважати, що одиницею тиску є (Па), то коефіцієнт об'ємного стиснення буде вимірюватися у (Па^{-1}) або у квадратних метрах на ньютон ($\text{м}^2/\text{Н}$).

Коефіцієнт об'ємного стиску можна виразити і через відносне збільшення питомої маси:

$$\beta_p = -\frac{d\rho}{\rho \cdot dp}, \text{ Па}^{-1} \quad (1.7)$$

Величина, зворотна коефіцієнту об'ємного стиснення, являє собою об'ємний модуль пружності рідини E , Па:

$$E = \frac{1}{\beta_p}, \text{ Па} \quad (1.8)$$

За нормальних умов приймають:

$$\beta_p = \frac{1}{2 \cdot 10^9} \text{ Па}^{-1}, \text{ тоді } E = 2 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Коефіцієнт температурного розширення β_t являє відносну зміну об'єму при зміні температури на 1 градус.

$$\beta_t = \frac{dW}{W \cdot dt}, \text{ Па}^{-1} \quad (1.9)$$

де dW – зміна об'єму, яка відповідає зміні температури dt .
Значення коефіцієнтів β_p ; β_t ; E подані у додатку В.

Приклад. Визначити підвищення тиску, при якому початковий об'єм води зменшиться на 1,5 %.

Розв'язання. З формули (1.6) знайдемо:

$$dp = \frac{dW}{W} \cdot \frac{1}{\beta_p},$$

де $\Delta W/W$ за умовою задачі становить 0,015.

Коефіцієнт стислості для води за додатком 3 $\beta_p = 5,2 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ (середнє значення, бо температура води не задана).

$$dp = \frac{0,015}{5,2 \cdot 10^{-10}} = 28,85 \cdot 10^6 \text{ Па} = 28,85 \text{ МПа}.$$

1.1.3 В'язкість

В'язкість рідини – це результат взаємодії внутрішньомолекулярних силових полів, які перешкоджають відносному рухові між двома шарами рідини.

Отже, для переміщення частинок одна відносно одної необхідно подолати їх взаємне тяжіння, причому чим воно більше, тим більша потрібна сила зсуву.

В'язкість є однією з важливих причин втрат енергії в потоці рідини.

Закон в'язкого тертя Ньютона математично записується виразом:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dU}{dh}, \quad (1.10)$$

де τ – напруження зсуву, що виникають між двома паралельними шарами рідини;

$\frac{dU}{dh}$ – градієнт швидкості, тобто зміна швидкості на одиницю довжини;

μ – коефіцієнт пропорційності, який є фізичним параметром і називається *динамічною в'язкістю*

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dU}{dh}}, \quad (1.11)$$

Динамічна в'язкість дистильованої води при 4 °С становить $10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, або $1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

У ряді задач у гідравліці часто використовують відношення динамічної в'язкості μ до питомої маси рідини або газу ρ , яке позначають літерою ν , тобто:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.12)$$

Це відношення називають *кінематичною в'язкістю*. Кінематична в'язкість води при 4 °С становить $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; для повітря при нормальних атмосферних умовах $\nu = 14,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, або Стоксах $1 \text{ ст} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Відомості про динамічну та кінематичну в'язкості наведені у додатку Г.

Контрольні запитання

1. Що таке питома маса і питома вага? Який між ними зв'язок ?
2. Що таке стислість, пружність і якими параметрами вони характеризуються?
3. Як записується закон Ньютона для внутрішнього тертя в рідині ?
4. Що таке динамічна і кінематична в'язкість? Який зв'язок між ними?

Приклади розв'язання задач

Задача 1. Визначити, який об'єм води необхідно додатково подати до водоводу діаметром $d = 500$ мм та довжиною $l = 1$ км для підвищення тиску до $\Delta p = 5 \cdot 10^6$ Па. Водовід підготовлений до гідравлічних випробувань і залитий водою при атмосферному тиску. Деформацією труб можна знехтувати.

Розв'язання. Ємність водоводу

$$W_{TP} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l = \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 1000 = 196,2 \text{ м}^3.$$

Об'єм води ΔW який треба подати до водоводу для підвищення тиску знайдемо з співвідношення (1.6)

$$\beta_p = \frac{dW}{W \cdot dp} = \frac{dW}{(W_{TP} + dW) \cdot dp}.$$

З додатка В беремо значення $\beta_p = 5,2 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1} = 0,5 \cdot 10^9 \text{ Па}^{-1}$.

Тоді:

$$dW = \frac{W_{TP} \cdot \beta_p \cdot dp}{1 - \beta_p \cdot dp} = \frac{196,2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^6}{1 - 0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^6} = 0,493 \text{ м}^3.$$

Задача 2. Визначити середню товщину сольових відкладень $S_{\text{від}}$ у водоводі з внутрішнім діаметром $d_{\text{тр}} = 0,3$ м та довжиною $l = 2$ км. При витіканні води в кількості $\Delta W = 0,05 \text{ м}^3$ тиск в водоводі зменшився на $\Delta p = 1 \cdot 10^6$ Па.

Розв'язання. Приймаємо значення $\beta_p = 5,2 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1} = 0,5 \cdot 10^9 \text{ Па}^{-1}$. Тоді ємність водоводу з виразу (1.6)

$$W = \frac{0,05}{0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^6} = 100 \text{ м}^3.$$

Середній внутрішній діаметр водоводу

$$d = \sqrt{\frac{4W}{\pi l}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 100}{3,14 \cdot 2000}} = 0,252 \text{ м}.$$

Середня товщина шару:

$$S = \frac{d_{\text{мп}} - d}{2} = \frac{0,3 - 0,252}{2} = 0,024 \text{ м} = 24 \text{ мм}.$$

Задача 3. У системі опалення (котел, радіатори та трубопроводи) невеликого будинку вміщає $W = 0,4^3$ м води. Скільки води додатково зайде до розширювального бака при нагріванні від 20 до 90 °C?

Розв'язання. Питома маса води при температурі 20 °C $\rho_{20}^0 = 998,23 \text{ кг/м}^3$.
Маса води

$$M = W \cdot \rho_{20}^0 = 0,4 \cdot 998,23 = 399 \text{ кг.}$$

Питома маса води при температурі 90 °C $\rho_{90}^0 = 965,34 \text{ кг/м}^3$.

Об'єм, який займає вода

$$W = \frac{M}{\rho_{90}^0} = \frac{399}{965,34} = 0,414 \text{ м}^3.$$

Додатковий об'єм

$$\Delta W = 0,414 - 0,4 = 0,014 \text{ м}^3.$$

1.2 Основне рівняння рівноваги рідини під дією сил ваги

Тиск на поверхні рідини позначено через p_0 . При дії на рідину тільки сил ваги (стан абсолютного спокою) будемо мати

$$dp = -\rho g dz \quad (1.13)$$

У результаті інтегрування цього рівняння для рідини, що не стискається одержимо:

$$z + \frac{p}{\rho g} = C. \quad (1.14)$$

Для знаходження константи інтегрування C візьмемо на поверхні рідини, для якої $z = z_0$, а $p = p_0$. Тоді вираз (1.14) можна подати так:

$$z + \frac{p}{\rho g} = z_0 + \frac{p_0}{\rho g}. \quad (1.15)$$

Рівняння (1.14) називають основним рівнянням гідростатики. Вираз (1.15) можна переписати у вигляді

$$p = p_0 + \rho g (z_0 - z),$$

або, взявши до уваги, що $z_0 - z = h$,

$$p = p_0 + \rho g h \quad (1.16)$$

Формула (1.16) дає змогу визначити гідростатичний тиск у будь-якій точці рідини, що перебуває у стані спокою, а саме абсолютний тиск в точці дорівнює сумі зовнішнього поверхневого і вагового тиску (величина $\rho g h = \gamma h$ називається ваговим тиском).

З рівняння (1.16) випливає закон Паскаля: *всяка зміна тиску в будь-якій точці рідини, що перебуває у стані спокою, яка не порушує її рівноваги, в усі інші точки передається однаково.*

У відкритій посудині на поверхні рідини діє атмосферний тиск, тобто $p_0 = p_{\text{атм}}$.

$$p = p_{\text{атм}} + \rho g h. \quad (1.17)$$

Перевищення абсолютного тиску над атмосферним називають *надлишковим тиском*, тобто $p_{\text{над}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}}$, або *манометричним тиском*.

Різницю між атмосферним і абсолютним тиском називають *вакуумом*, тобто

$$p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{абс}}. \quad (1.18)$$

1.2.1 Геометричне і фізичне тлумачення основного рівняння гідростатики

Для виконання геометричного і фізичного тлумачення основного рівняння гідростатики розглянемо рисунок 1.1.

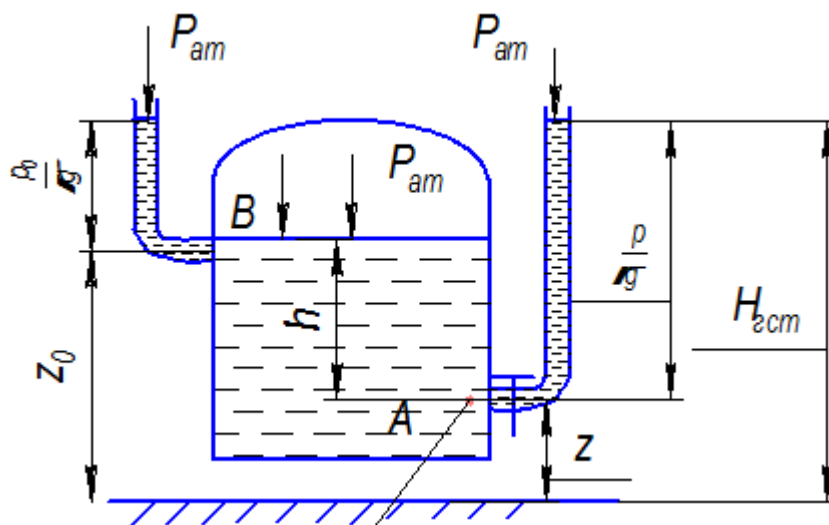


Рисунок 1.1 – Схема для геометричного та фізичного тлумачення основного рівняння гідростатики

Координата z у рівнянні (1.14) з геометричної точки зору характеризує положення довільної точки відносно прийнятої горизонтальної площини порівняння, тобто тієї площини, від якої ведеться відлік координат. Величину z називають *геометричною висотою* або *висотою положення*.

Що стосується величини $p/\rho g$, то легко переконатися, що вона також має розмірність довжини l , і називається *п'єзометричною висотою*, яка відповідає *абсолютному тискові* у точці, якщо p – абсолютний тиск.

Якщо при обчисленні $p/\rho g$ в точці визначають надлишковий тиск, то величину $p/\rho g$ називають *п'єзометричною висотою*, яка відповідає *надлишковому тискові* в точці, або просто *п'єзометричною висотою*.

Таким чином, з геометричної точки зору сума двох величин в основному рівнянні гідростатики $z + p/\rho g = \text{const}$ є сумою двох висот: висоти положення і п'єзометричної. Суму цих двох висот яка відповідає абсолютному тискові, називають *повним* або *абсолютним гідростатичним напором*:

$$H_{\text{пов}} = z + \frac{p_{\text{абс}}}{\rho g}. \quad (1.19)$$

Якщо в розрахунках визначають не повний, а надлишковий, то:

$$H = z + \frac{p}{\rho g}. \quad (1.20)$$

Цю величину називають *п'єзометричним напором*.

Отже, з геометричної точки зору: для всіх часток рідини, яка перебуває у стані спокою, *сума висоти положення і п'єзометричної висоти – величина стала і дорівнює гідростатичному напору*.

Рідина в стані спокою має певний запас потенціальної енергії. Неважко показати, що з енергетичної точки зору величина $z + p/\rho g$ є мірою питомої потенціальної енергії.

Величину $z + p/\rho g$ називають також *потенціальним напором*.

Отже, з фізичної точки зору основне рівняння гідростатики можна тлумачити так: для всіх частинок однорідної рідини, яка перебуває у стані спокою, питома потенціальна енергія – величина постійна і дорівнює потенціальному напорові.

Приклад 1. Визначити питому морської води на глибині 300 м, де надлишковий тиск дорівнює 3,08 МПа.

Розв'язання. Оскільки на поверхні моря тиск атмосферний, то значення надлишкового тиску відповідно до (1.16) становить $p = \rho gh$, звідки:

$$\rho = \frac{p}{gh} = \frac{3,08 \cdot 10^6}{9,81 \cdot 300} = 1047 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 2. Знайти значення тиску p_o , прикладеного до поверхні рідини в закритому резервуарі (див. рис. 1.1), якщо вода в п'єзометрі піднялась на висоту $h_1 = 1,2$ м, а точка підключення п'єзометра А перебуває на глибині $h = 0,6$ м.

Розв'язання. Відповідно до основного закону гідростатики можна записати, що

$$p_o + \gamma h_1,$$

звідки

$$p_o = \rho g (h_1 + h) = 1000 \cdot 9,81 (1,2 - 0,6) = 5886 \text{ Па}.$$

1.3 Визначення сили тиску на плоскі стінки і дно посудини

У різних галузях інженерної практики потрібно знати силу, з якою рідина діє на тверді стінки, що її обмежують, а також точку прикладення рівнодійної сили або положення центру тиску.

Найпростіше визначення сила тиску на горизонтальне дно посудини (рис. 1.2). Очевидно, що коли площа дна посудини ω , то силу тиску на горизонтальне дно обчислюють:

$$P = p\omega = (p_{at} + \rho gH)\omega. \quad (1.21)$$

Без урахування тиску p_{at} , що діє на поверхню рідини, сила надлишкового тиску становить

$$P = \rho g\omega H. \quad (1.22)$$

З формул (1.21) і (1.22) випливає, що сила тиску рідини на плоске дно посудини довільної форми залежить тільки від величин ρ , g , ω , H і не залежить від форми посудини. Це суперечить логіці і називається *гідростатичним парадоксом*.

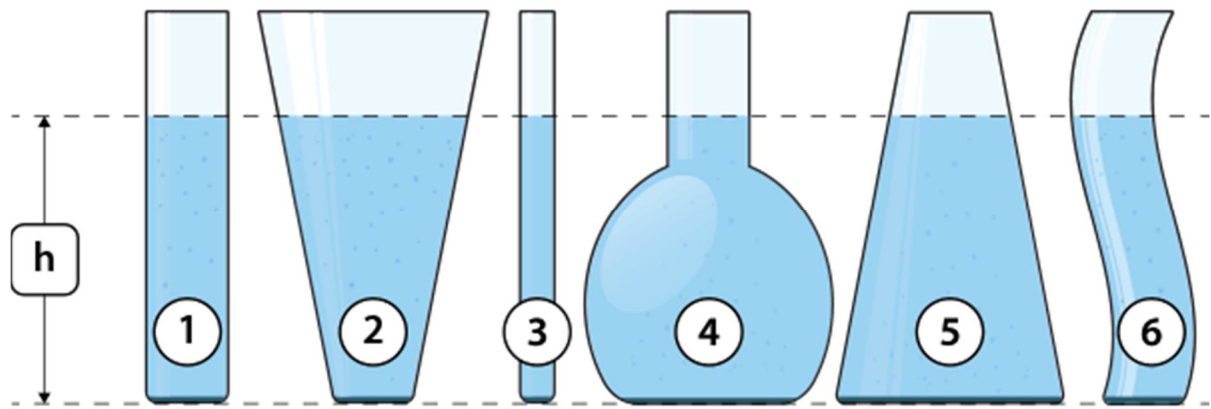


Рисунок 1.2 – Види посудин з рідиною для визначення сили тиску на дно посудини

З рисунку 1.2 видно, що всі посудини з однаковими висотами стовбців води, тому тиск на дно всіх посудин однаковий.

Визначимо тепер силу тиску на плоску стінку. Розглянемо закритий резервуар (рис. 1.3), плоска стінка якого нахилена під кутом α до горизонту і перебуває, з одного боку, під дією тиску рідини і зовнішнього тиску P_o , а з другого – атмосферного тиску P_{am} .

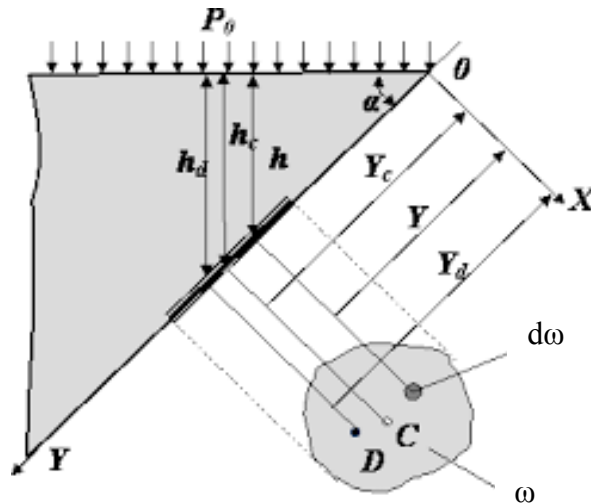


Рисунок 1.3 – Схема для визначення сили тиску рідини на плоску стінку посудини

Розіб'ємо всю площу змоченої частини стінки ω на безмежно малі площинки $d\omega$.

Сила тиску на кожну площинку:

$$dP = [(P_o + \rho gh) - P_{am}]d\omega = \rho gz d\omega, \quad (1.23)$$

де

$$z = h_{\Pi} + h;$$

h – глибина занурення центра ваги площинки під рівень.

З рисунку 1.3 видно, що $z = y \sin \alpha$, отже

$$dP = \rho g y \sin \alpha d\omega \quad (1.24)$$

Сила тиску на плоску стінку

$$P = \int dP = \rho g \cdot \sin \alpha \int_{\omega} y d\omega, \quad (1.25)$$

$$\int_{\omega} y d\omega = y_c \cdot \omega$$

де y_c – відстань центра ваги площі ω від осі Ox .

Таким чином,

$$P = \rho g y_c \sin \alpha \omega, \quad (1.26)$$

або

$$P = \rho g z_c \omega = \rho g (h_{\Pi} + h_e) \omega = (\Delta p + \rho g h_e) \omega, \quad (1.27)$$

де

$$\Delta p = p_o - p_{at}.$$

Отже: *сила тиску на плоску стінку визначається як добуток площі стінки на гідростатичний тиск у центрі ваги стінки.*

У випадку відкритого резервуара $P_o = P_{at}$

$$P = \rho g h_c \omega \quad (1.28)$$

Точку прикладення рівнодійної сил тиску рідини, тобто положення центра тиску, знайдемо, використавши теорему про момент рівнодійної сили: *момент рівнодійної сили відносно довільної осі дорівнює сумі моментів складових сил відносно цієї ж осі.*

Отже,

$$P_{y_D} = \int y dP. \quad (1.29)$$

Підставивши вирази для dP і P з формул (1.24) та (1.26) і після скорочення на $\rho g \sin \alpha$ запишемо:

$$y_D = \frac{\int y^2 d\omega}{y_c \cdot \omega}. \quad (1.30)$$

Чисельник виразу (1.30) являє собою момент інерції I_x

$$y_D = \frac{I_0}{y_c \cdot \omega}, \quad (1.31)$$

$$y_D = y_c + \frac{I_0 \sin^2 \alpha}{y_c \cdot \omega}, \quad (1.32)$$

де I_0 – момент інерції площі змоченої поверхні відносно горизонтальної осі, яка проходить через центр ваги.

y_c – центр ваги площі змоченої поверхні плоскої фігури.

$$h_c = y_c + \frac{I_0}{y_c \cdot \omega}, \quad (1.33)$$

Приклад 1. Визначити силу тиску води на плоску вертикальну стінку і знайти положення центра тиску. Стінка прямокутна з шириною $b = 5$ м і висотою 8 м. Прийняти що верх стінки збігається з вільною поверхнею.

Розв'язання. За формулою (1.28) маємо

$$P = \rho \cdot g \cdot \frac{H^2}{2} \cdot b = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{8^2}{2} \cdot 5 = 1569600 \text{ Н} = 1,57 \text{ МН}.$$

Для знаходження центра тиску використовуємо формулу (1.33), зваживши, що $y_D = h_D$, $y_C = h_C$, а момент інерції $I_o = bH^3/12$.

Тоді

$$h_D = \frac{H}{2} + \frac{bH^3}{12 \cdot \frac{H}{2} \cdot b \cdot H} = \frac{H}{2} + \frac{H}{6} = \frac{2}{3}H = \frac{2}{3} \cdot 8 = 5,33 \text{ м}.$$

1.4 Визначення сили тиску на криволінійні поверхні

Знаходження сил тиску на криволінійній поверхні ускладнюється тим, що в загальному випадку сили тиску, які діють на елементи криволінійної поверхні, не є паралельними між собою.

Щоб визначити сили тиску на криволінійну поверхню, які складаються з горизонтальної та вертикальної складових (рис. 1.4). Візьмемо циліндричну поверхню АВ з утворюючою, яка перпендикулярна до площини креслення (рис. 1.4), та визначимо силу тиску рідини на цю поверхню в двох випадках:

- 1) рідина розташована зверху (рис. 1.4, а);
- 2) рідина розташована знизу (рис. 1.4, б).

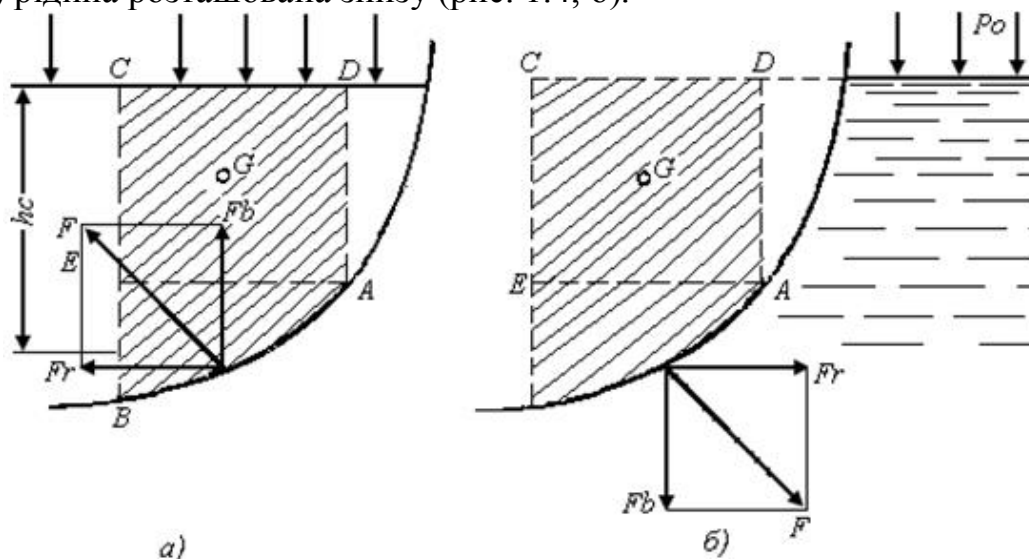


Рисунок 1.4 – Визначення сили тиску на криволінійні поверхні:

а – рідина розташована над криволінійною поверхнею; б – рідина розташована під криволінійною поверхнею

На виділений об'єм діють зовнішні сили:

1. Власна вага рідини G ;
2. Горизонтальна складова сили тиску на вертикальну грань, що дорівнює

P_x ;

3. Реакція криволінійної поверхні R зі складовими R_x і R_z ;

4. Вертикальна реакція S_z з боку дна ділянки.

Припустимо, що рідина затверділа, тоді сили які діють на цей об'єм в проекціях на весь Ox , буде:

$$P_x - R_x = 0 \rightarrow P_x = R_x$$

На вісь Oz можна записати

$$G - R_z - S_z = 0 \rightarrow R_z = G - S_z = P_z$$

Оскільки S_z дорівнює вазі в об'ємі (рис. 1.4, а), то

$$G - S_z = P_z = \pm \rho g W, \quad (1.34)$$

де W – об'єм заштрихованого на рисунку 1.4 відсіку.

Цей об'єм прийнято називати об'ємом тіла тиску, і він є реальним (позитивним) при заповненні тіла тиску рідиною (рис. 1.4, а), у цьому випадку у формулі (1.34) береться знак плюс. Тіло тиску буде фіктивним (негативним), якщо воно не заповнене рідиною (рис. 1.4, б) і тоді у формулі (1.34) – знак мінус.

Горизонтальному компоненту тиску, за аналогією з формулою (1.27) запишемо так:

$$P_x = \rho g h_x \omega_x, \quad (1.35)$$

де h_x – глибина занурення центра ваги вертикальної проекції криволінійної поверхні;

ω_x – площа вертикальної проекції криволінійної поверхні (перпендикулярно до осі Ox).

Повна сила тиску на криволінійну поверхню становитиме:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2}. \quad (1.36)$$

Напрямок сили дії P визначається кутом β , причому:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P_z}{P_x}. \quad (1.37)$$

Якщо на поверхню рідини діє тиск P_o , відмінний від атмосферного:

$$P_x = \rho g z_{cx} \omega_x = \rho g (h_n + h_{cx}) \omega = (\Delta p + \rho g h_{cx}) \omega_x \quad (1.38)$$

а сила

$$P_z = (p_o - p_{am}) \omega_z + \rho g W = \rho g (h_n \omega_z + W) = \rho g (W_o - W), \quad (1.39)$$

де ω_z – площа горизонтальної проекції криволінійної поверхні,

W_o – додатковий об'єм тіла тиску за рахунок дії тиску P_o .

Приклад 1. Круглий отвір у вертикальній стінці відкритого резервуару з водою перекрито сферичною кришкою (рис. 1.5) діаметром $d = 1$ м. Глибина занурення центра ваги кришки $h_e = 2$ м. Визначити силу тиску на кришку і напрямок її дії відносно горизонту.

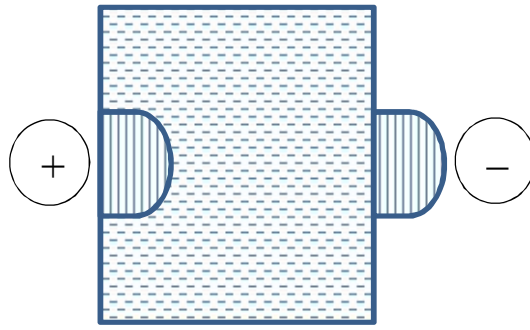


Рисунок 1.5 – Схема резервуару з отворами в стінках до прикладу 1

Розв'язання. Горизонтальну компоненту P_x знаходимо за формулою (1.35)

$$P_x = \rho g h_c \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 15401,7 \text{ Н} = 15,4 \text{ кН.}$$

Вертикальна компонента:

$$P_z = \rho g W = \rho g \cdot \frac{\pi d^3}{12} = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{3,14 \cdot 1^3}{12} = 2567 \text{ Н} = 2,57 \text{ кН.}$$

Повна сила тиску:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{15,4^2 + 2,57^2} = 15,6 \text{ кН.}$$

1.5 Закон Архімеда та елементи теорії плавучості

Закон Архімеда можна сформулювати так: *на тіло, повністю або частково занурене в рідину, діє вертикальна і спрямована вгору виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі витісненої рідини*. Цей тиск називають силою виштовхування або підйомною силою:

$$P_{\text{виш}} = \rho \gamma W_{\text{зан}}, \quad (1.40)$$

де ρ – питома маса рідини.

Для тіла, яке плаває на поверхні рідини, справедливе співвідношення:

$$\frac{W_{\text{зан}}}{W} = \frac{\rho_T}{\rho}, \quad (1.41)$$

де W – об'єм тіла яке плаває,

ρ_T – питома маса тіла.

Вагу рідини, витісненої тілом, називають *водотоннажністю*, а центр ваги маси рідини в об'ємі зануреної частини тіла – центром *водотоннажності*.

За наявності температурного поля питома маса рідини залежить від температури. З її підвищенням питома маса зменшується, а співвідношення питомих мас рідини в двох точках можна визначити:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = 1 + \beta_t \cdot \Delta t, \quad (1.42)$$

де ρ_0 – питома маса рідини при температурі 0°C ;

β_t – коефіцієнт температурного розширення;

Δt – різниця температур.

Теорія плавання тіл основана на законі Архімеда. Можуть існувати такі випадки:

$G > P_z$ (P_z – підйомна сила) – тіло тоне.

$G = P_z$ – тіло плаває в зануреному стані.

$G < P_z$ – тіло впливає на поверхню.

При плаванні неоднорідного тіла в зануреному стані можливі такі три випадки (рис. 1.6): стійка рівновага тіла (схема б); нестійка рівновага тіла (в); байдужа рівновага тіла (а).

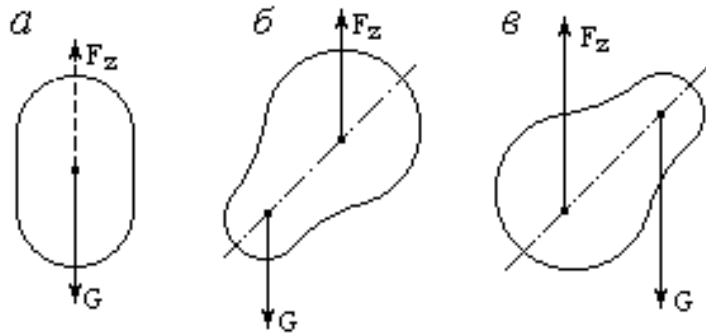


Рисунок 1.6 – Схема плавання тіла:

а – байдужа рівновага тіла, б – стійка рівновага; в – нестійка рівновага.

Якщо центр ваги (рис. 1.6, б) нижче точки центра водотоннажності, то рівновага є стійкою. Коли центр ваги вище центра водотоннажності (рис. 1.6, в), то рівновага є нестійкою.

Остійністю судна називають його здатність повертатися в початковий стан рівноваги.

Приклад. Камінь масою 80 кг лежить на дні водоймища: його об'єм $3,4 \cdot 10^4 \text{ см}^3$. Яка потрібна сила, щоб відірвати камінь від дна?

Розв'язання. Виштовхувальна сила, яка діє на камінь у воді, дорівнює вазі води об'ємом $3,4 \cdot 10^4 \text{ см}^3$.

$$P_z = \rho g W = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,4 \cdot 10^4 = 333,5 \text{ Н.}$$

Вага каменя

$$G = Mg = 80 \cdot 9,81 = 784,8 \text{ Н.}$$

Сила потрібна для відриву каменя,

$$F = G - P_z = 784,8 - 333,5 = 451,3 \text{ Н.}$$

Задачі для розв'язання

Задача 1. Визначити питому вагу рідини, яка не змішується з водою і налита у ліве коліно U-образної скляної трубки на висоту $h = 1,0 \text{ м}$, якщо у праве коліно трубки налита вода і її рівень знаходиться нижче рівня рідини у лівому коліні на $\Delta h = 0,2 \text{ м}$. Питома вага води $\gamma_v = 1 \text{ г/см}^3$ (рис. 1.7).

Задача 2. Визначити абсолютний тиск p на поверхні води у сосуді (рис. 1.8) і вакуум при різниці рівнів води та ртуті $z_a = 0,5 \text{ м}$ і $z_b = 0,08 \text{ м}$, якщо $\gamma_v = 1,0 \text{ г/см}^3$ і $\gamma_{рт} = 13,6 \text{ г/см}^3$.

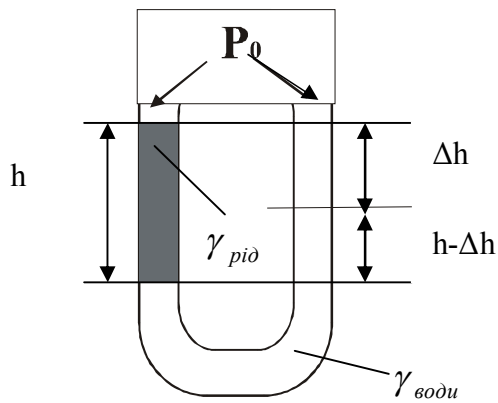


Рисунок 1.7 – Схема скляної U – образної трубки для задачі 1

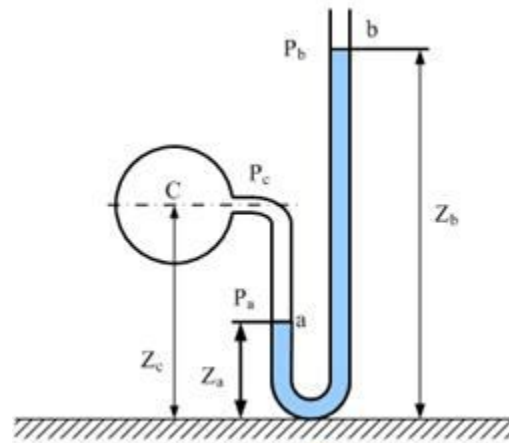


Рисунок 1.8 – Схема посудини для задачі 2

Задача 3. Бензин у гаражі зберігається у спеціальному резервуарі (рис. 1.9). Визначити висоту стовпа H бензину у резервуарі, якщо манометр, приєднаний до нього, показує тиск $P_m = 0,25 \text{ кг/см}^2$. Тиск на вільну поверхню бензину атмосферний. Питома вага бензину $\gamma = 755 \text{ кг/м}^3$. Манометр приєднаний на відстані $0,2 \text{ м}$ від дна резервуара.

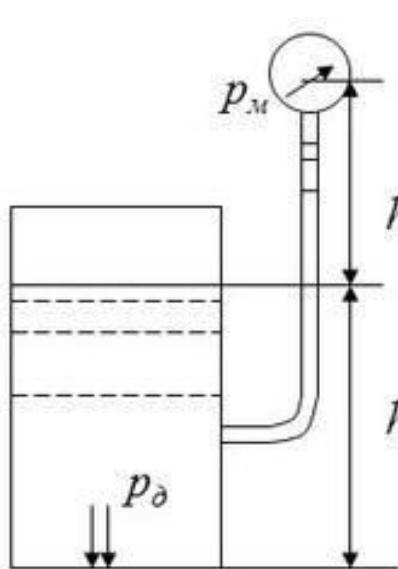


Рисунок 1.9 – Схема резервуару для задачі 3

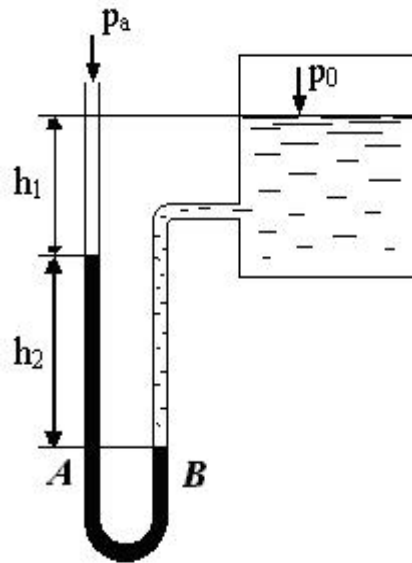


Рисунок 1.10 – Схема ртутного манометру (до задачі 6)

Задача 4. Визначити надлишковий тиск на дно посудини, якщо пружинний манометр, підключений до посудини на висоті $h = 1,0 \text{ м}$ від дна, показує тиск $P_m = 157000 \text{ Н/м}^2$ ($1,6 \text{ кг/см}^2$), а центр манометра знаходиться вище точки його підключення до посудини на $z = 1,0 \text{ м}$.

Задача 5. Визначити, на яку висоту підніметься гліцерин у трубці, якщо тиск на вільну поверхню рідини у закритій посудині $p_0 = 79676,5 \text{ н/м}^2$ ($0,812 \text{ кг/см}^2$).

Задача 6. Визначити висоту h_2 у U-образному ртутному манометрі (рис. 1.10), якщо $h_1 + h_2 = 400$ мм, а $P_o = 107400$ н/м² (1,096 кг/см²).

Задача 7. Вода подається до споруди сталевую клепаною трубою діаметром $d = 0,90$ м, котра повинна витримувати манометричний тиск $p_m = 10$ ат. Визначити товщину стінки трубопроводу, якщо допустиме напруження $\sigma = 800$ кг/см².

Задача 8. Бак для води склепаний з чотирьох рядів листової сталі при висоті кожного ряду $a = 1,5$ м. Визначити товщину стінки нижнього ряду, якщо бак повний води доверху. Діаметр бака $d = 8$ м. Допустиме напруження на розрив $\sigma = 800$ кг/см².

Задача 9. Визначити силу гідростатичного тиску на квадратний щит, який закриває отвір у похилій плоскій стіні (рис. 1.11), а також глибину занурення центра тиску при таких вимогах: $d = 0,3$ м, $a = 1$ м; $\alpha = 45^\circ$; питома вага води $\gamma = 1$ т/м³.

Задача 10. Бокова стіна резервуара має прямокутний отвір шириною $b = 1,2$ м і висотою $h = 1,0$ м (рис. 1.12), яке закривається щитом, який обертається і прижимається вантажем G . Довжина рычагу $r = 1,5$ м. Глибина води в резервуарі $H = 3,2$ м, підвищення осі обертання щита $a = 0,2$ м. Визначити силу G , і повне зусилля R , на котре розраховують шипи осі $O-O$.

Задача 11. Трикутний отвір, утворений зрізом кута резервуара, закрито трикутним щитом, з кутом нахилу $\alpha = 30^\circ$ до вертикалі (рис. 1.13). Основа a і висота b трикутного отвору дорівнює 2,0 м. Щит обертається навколо осі $O-O$ і утворюється цепом на відстані $n = 2,0$ м від основи трикутника та натягнутій під кутом $\beta = 120^\circ$ до щита. Знайти натяг цепу T і реакцію R осі $O-O$ при напорі $H = 3,2$ м.

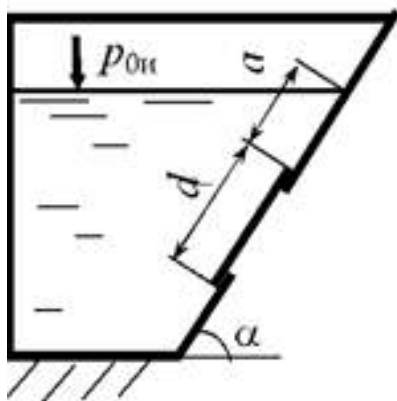


Рисунок 1.11 – Схема резервуару до задачі 9

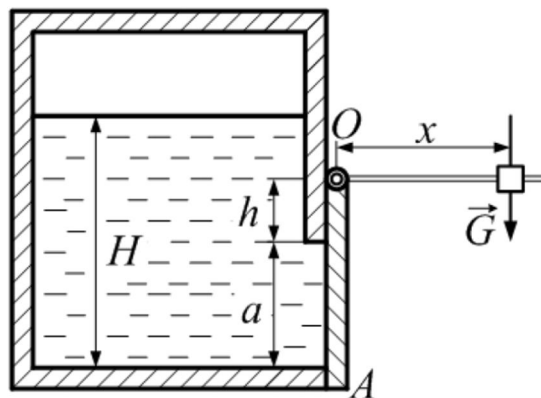


Рисунок 1.12 – Схема резервуару до задачі 10

Задача 12. У резервуарі, схема якого зображена на рисунку 1.14, висота стовпа бензину $H = 5$ м, питома вага якого $\gamma = 725$ кг/м³. У резервуарі є газ, який закритий кришкою $D = 0,8$ м. Від дна резервуара до центра ваги лазу $h = 0,9$ м. Кришка утримується болтами, кількість яких $n = 6$. Визначити силу тиску на кришку лазу і положення центру тиску. Знайти діаметр болтів, якщо допустиме напруження на розрив для болтів $\sigma = 750$ кг/см².

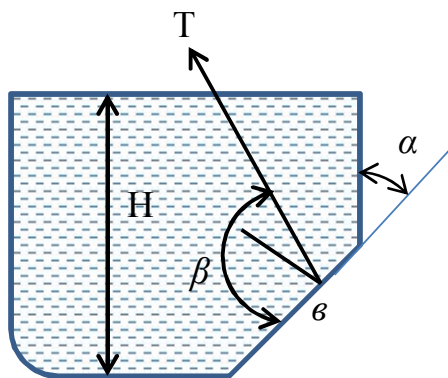


Рисунок 1.13 – Схема резервуару до задачі 11

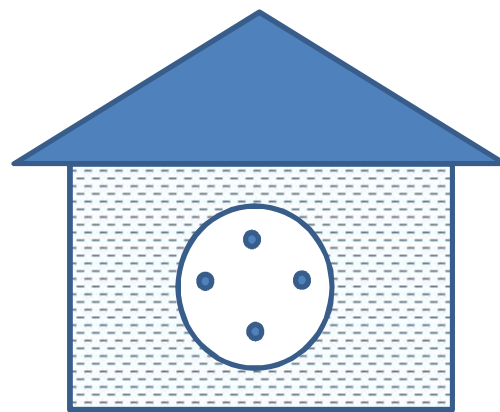


Рисунок 1.14 – Схема резервуару до задачі 12

Задача 13. Автогосподарство має бензосховище, випуск бензину з якого відбувається за допомогою труби діаметром $d = 300$ мм. Труба закрита відкидним клапаном, розташованим під кутом $\alpha = 45^\circ$ до горизонту (рис. 1.15). Глибина занурення центра ваги О клапана $H = 3$ м. Питома вага бензину $\gamma = 752$ кг/м³. Визначити силу T , котру треба докласти до тросу, для відкриття клапана.

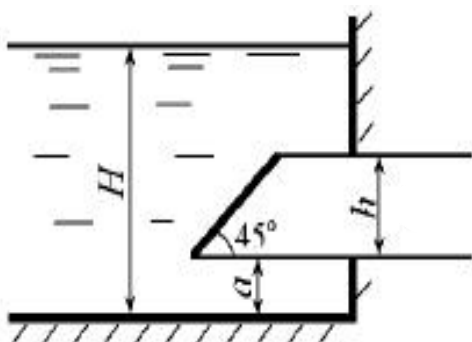


Рисунок 1.15 – Схема резервуару до задачі 13

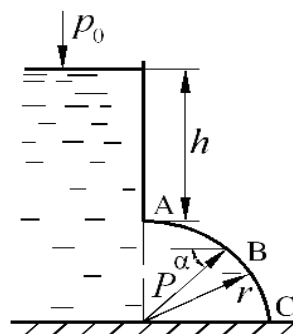


Рисунок 1.16 – Схема резервуару до задачі 14

Задача 14. Для зберігання бензину у гаражі використовується резервуар, який має фасону частину у вигляді четвертої частини циліндра (рис. 1.16). Радіус циліндра $r = 0,5$ м, довжина утворюючої $b = 0,9$ м. Висота стовпа бензину у резервуарі $H = 1,4$ м. Питома вага бензину $\gamma = 0,75$ т/м³.

Визначити силу гідростатичного тиску бензину на фасону частину резервуара та глибину занурення центра тиску.

Задача 15. Визначити силу гідростатичного тиску води на квадратний затвор та глибину занурення центра тиску. Радіус затвору $r = 2,5$ м. Довжина затвора $b = 4$ м. Глибина води $H = r$. Питома вага води $\gamma = 1$ т/м³.

Задача 16. Сегментний щит АВ радіуса $r = 7,5$ м підтримує воду при глибині її 4,8 м (рис. 1.17).

Центральний кут сектора $\varphi = 43^\circ$. Горизонтальна проекція щита $a = 2,7$ м. Ширина щита $b = 6,4$ м. Визначити силу тиску води на щит і найти місцеположення центра тиску.

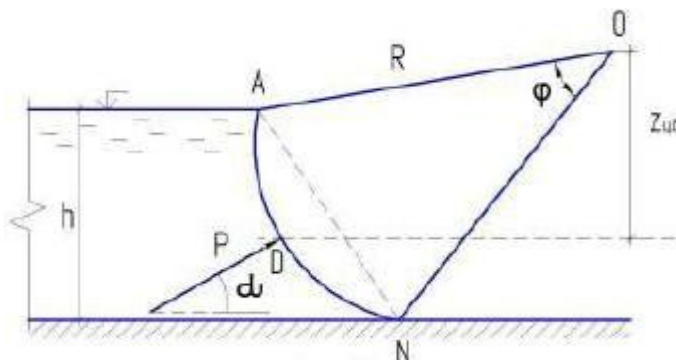


Рисунок 1.17 – Схема резервуару до задачі 16

Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення гідравліки як науки.
2. Що таке питома маса і питома вага рідин і газів?
3. Що таке стислість, пружність і якими параметрами вони характеризуються?
4. Що таке динамічна і кінетична в'язкість? Який зв'язок між ними?
5. Як впливають тиск і температура на в'язкість рідин і газів?
6. Дайте визначення нев'язкої рідини.
7. Назвіть сили, які діють в рідині?
8. Що таке гідростатичний тиск? Яка його розмірність?
9. Що таке п'єзометрична висота?
10. Запишіть основне рівняння гідростатики.
11. Як визначити тиск на плоску стінку і як знаходять центр тиску?
12. У чому полягає суть визначення сили тиску на криволінійну поверхню?
13. Що треба розуміти під термінами «плавучість» і «остійність» плаваючих тіл?
14. Якими приборами вимірюється гідростатичний тиск?
15. Що таке центр тиску?
16. Що таке підйомна сила?
17. Сформулюйте закон Архімеда.
18. За якою формулою визначається тиск на горизонтальне дно сосуду?

1.6 Види руху рідини

Кінематикою рідини називають розділ гідравліки, в якому вивчають можливі види й форми руху рідини та газу, незалежно від діючих сил.

У кінематиці рідини вивчають геометричні та кінематичні властивості руху.

Розділяють два види руху : *несталий і сталий*.

Несталим називають такий рух, при якому всі гідравлічні характеристики (швидкість, тиск, глибина потоку) в будь-якій точці потоку змінюється в часі, тобто

$$v = f_1(x, y, z, t); p = f_2(x, y, z, t); h = f_3(x, y, z, t);$$

Несталий рух є найбільш поширеним і складним видом руху в природі і техніці.

Сталим називають такий рух, при якому всі гідравлічні характеристики постійні в часі і будь-якій точці потоку.

Сталий рух, у свою чергу, можна поділити на *рівномірний* і *нерівномірний*.

Під *рівномірним* рухом в гідравліці розуміють такий рух, при якому швидкість, тиск, а також їх розподіл за перерізом у разі постійної форми та розмірів живого перерізу не змінюється вздовж шляху руху рідини.

Нерівномірним рухом називають рух рідини, при якому швидкість, а також її розподіл за перерізом та всі гідравлічні характеристики не постійні вздовж шляху.

Залежно від сил, які зумовлюють рух, та наявності поверхонь, що обмежують потік, розрізняють *напірний* і *безнапірний* рухи.

1.7 Лінії та трубки течії

Крива, яка дає змогу визначити напрямок дійсних місцевих швидкостей в усіх точках цієї кривої, називають *лінією течії*. В умовах сталого руху лінії течії не змінюють свого обрису в потоці. При несталому русі лінії течії та траєкторії не суміщаються, як при стаціонарному русі.

Сукупність ліній течії для будь-якого руху називають *спектром течії*.

Поверхню, утворену лініями течії, проведеними через усі точки цього замкненого контуру, називають *трубкою течії*, а масу рідини, що протікає всередині трубки течії, – *елементарним струменем*. Елементарний струмінь є наочним кінематичним образом, який істотно полегшує вивчення руху рідини і покладений в основу так званої струминної моделі руху рідини.

1.8 Гідравлічні характеристики потоку рідини

Живим перерізом ω називають площу поперечного перерізу, нормального до напрямку руху.

Змоченим периметром χ називають ту частину периметра живого перерізу, по якій рідина стикається зі стінками, що її обмежують.

Кількість рідини W , яка протікає через живий переріз потоку за одиницю часу t , називають *витратою потоку*, Q м³/с.

$$Q = \frac{W}{t}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (1.43)$$

Середня швидкість – це уявна величина, однакова для всіх точок живого перерізу, при якій пропускається така ж кількість рідини, як і при дійсних швидкостях, тобто:

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{1}{\omega} \int U d\omega. \quad (1.44)$$

Гідравлічним радіусом R називають відношення площі живого перерізу до змоченого периметра тобто:

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (1.45)$$

При сталому русі нев'язкої рідини витрата за всіма живими перерізами однакова

$$Q = V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2 = \dots V_n \omega_n = \text{const} \quad (1.46)$$

де $V_1, V_2, \dots V_n$ – середня швидкість в усіх живих перерізах потоку $\omega_1, \omega_2, \dots \omega_n$.

З цього рівняння витікає:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \dots = \text{const}. \quad (1.47)$$

1.9 Рівняння Д. Бернуллі

Рівняння Д. Бернуллі, дає зв'язок між тиском, середньою швидкістю і геометричною висотою в різних перерізах потоку, є основним рівнянням практичної гідродинаміки. Записане для двох перерізів 1–1 та 2–2 воно має такий вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \Sigma h_w^{1-2} = H = \text{const}. \quad (1.48)$$

де z – геометрична висота, яка характеризує потенційну енергію положення одиниці ваги рідини (питома енергія положення);

$\frac{p}{\gamma}$ – п'єзометрична висота, яка характеризує потенційну енергію тиску

одиниці ваги рідини (питома енергія тиску);

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ – висота швидкісного напору, яка характеризує кінетичну енергію

одиниці ваги рідини (питома кінетична енергія);

Σh_w^{1-2} – втрачена висота, яка характеризує енергію одиниці ваги, витрачену на подолання гідравлічних опорів між двома перерізами (питома енергія тертя);

α – коефіцієнт нерівномірного розподілу швидкостей по перерізу потоку (коефіцієнт Коріоліса).

Геометричний зміст рівняння Бернуллі:

При сталому русі рідини сума чотирьох висот кожного живого перерізу потоку є величина постійна і дорівнює повному напору

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} + \Sigma h_w^{1-2} = H. \quad (1.49)$$

Фізичний зміст рівняння Бернуллі: при сталому русі рідини сума чотирьох питомих енергій залишається незмінною вздовж потоку і дорівнює загальному запасу питомої енергії.

За допомогою рівняння Бернуллі вирішується більшість задач практичної гідравліки.

До рівняння Бернуллі входить величина Σh_w^{1-2} , яка вміщує в себе суму втрат:

а) втрати опору за довжиною, h_l – втрати, витрачені на подолання опору тертя;

б) місцеві втрати напору h_m – втрати, які викликаються різкими змінами конфігурації меж потоку.

$$\Sigma h_w^{1-2} = h_l + h_m. \quad (1.50)$$

1.10 Режим руху рідини

Існують два режими руху рідини: ламінарний та турбулентний. При ламінарному режимі рідина рухається струминками, які не змішуються. При турбулентному режимі, навпаки, існує сильне змішування часток рідини.

Для визначення характеру руху використовують число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu}, \quad (1.51)$$

де l – характерний розмір потоку, м;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м²/с.

Для труб круглого перерізу число Рейнольдса розраховують за формулою:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}. \quad (1.52)$$

Для інших видів перерізів (для відкритих русел):

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu}, \quad (1.53)$$

або

$$Re = \frac{V \cdot d_{екв}}{\nu}, \quad (1.54)$$

де $d_{екв}$ – еквівалентний (гідравлічний діаметр).

Критичні значення числа Рейнольдса дорівнюють:

Для напірних потоків – формула (1.52) – $Re_{кр} = 2000 \div 2400$.

Для безнапірних потоків – формули (1.53) – (1.54) – $Re_{кр} = 500 \div 600$.

Приклад 1. Визначити витрату води Q в трубі діаметром $d_1 = 250$ мм, яка плавно звужується до діаметра $d_2 = 125$ мм, показання п'єзометрів: до звуження $h_1 = 50$ см; у звуженні $h_2 = 30$ см, температура води 20 °С (рис. 1.18).

Розв'язання. Запишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1–1 і 2–2, приймаємо за площину відліку вісь труби:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \Sigma h_w^{1-2}.$$

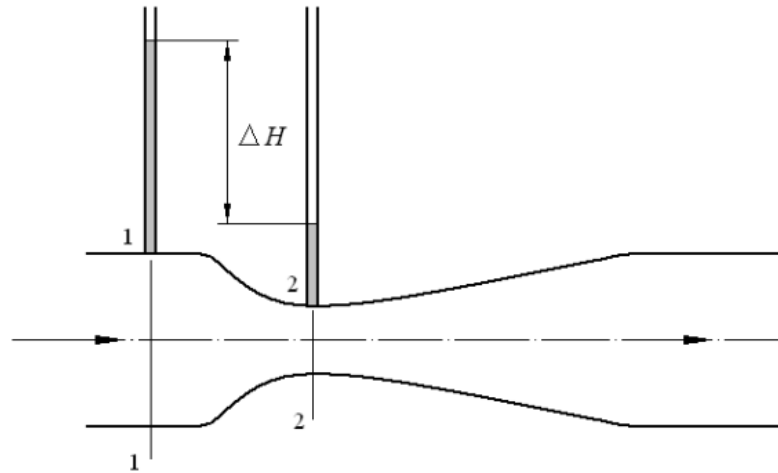


Рисунок 1.18 – Схема витратоміру Вентурі (до прикладу 1)

$Z_1 = Z_2 = 0$, $h_w^{1-2} = 0$ та $\alpha = 1$ маємо:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{p_2}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}.$$

Із рівняння нерозривності потоку: $\omega_1 V_1 = \omega_2 V_2$,

$$\omega_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}; \quad \omega_2 = \frac{\pi d_2^2}{4}.$$

Підставимо ці значення у попереднє рівняння нерозривності потоку:

$$V_2 = V_1 \frac{d_1^2}{d_2^2}.$$

Тоді рівняння Бернуллі запишемо:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{p_2}{\gamma} = \Delta H;$$

$$\Delta H = \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1 \right).$$

Звідки:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta H}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}.$$

Витрата води у трубі:

$$Q = \omega_1 V_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta H}{\frac{d_1^4}{d_2^4} - 1}}$$

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,2}{\frac{0,25^4}{0,125^4} - 1}} = 0,0245 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приклад 2. Конденсатор парової турбіни, змонтований на електростанції, обладнаний 8186 охолоджувальними трубами діаметром $d = 0,025$ м. За нормальних умов роботи через конденсатор проходить $13600 \text{ м}^3/\text{с}$ циркуляційної води з температурою $12,5 - 13 \text{ }^\circ\text{C}$. Чи буде забезпечено турбулентний режим руху у трубах?

Розв'язання. Витрата через конденсатор

$$Q = 13600 / 3600 = 3,78 \text{ м}^3/\text{с}$$

А через кожну трубку

$$q = 3,78 / 8186 = 0,000462 \text{ м}^3/\text{с}$$

Площа перерізу кожної трубки

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{4} = 0,00049 \text{ м}^2.$$

Швидкість руху води

$$V = \frac{q}{\omega} = \frac{0,000462}{0,00049} = 0,945 \text{ м/с}.$$

Кінематична в'язкість води $\nu = 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (за додатком Д).

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{0,945 \cdot 0,025}{1,23 \cdot 10^{-6}} = 19200$$

Таким чином $Re > Re_{кр} = 19200 > 2320$, тобто рух води буде турбулентним.

1.11 Втрати напору за довжиною

Рівномірний рух рідини спостерігається у тих випадках, коли живий переріз за довжиною незмінний (наприклад, напірні труби, де діаметр незмінний).

Коли рух рідини у трубах рівномірний, то втрати опору на тертя за довжиною h_l як при турбулентному так і ламінарному русі визначаються для круглих труб за формулою Дарсі – Вейсбаха:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (1.55)$$

а для труб будь-якої іншої форми перерізу за формулою:

$$h_l = \lambda \frac{l}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g} = \lambda \frac{l}{d_{екв}} \cdot \frac{V^2}{2g}; \quad (1.56)$$

у деяких випадках використовують формулу:

$$h_l = \frac{V^2}{C^2 \cdot R} \cdot l; \quad (1.57)$$

втрати тиску на тертя за довжиною визначають за формулою:

$$\Delta p_l = \lambda \frac{l}{d_{екв}} \rho \frac{V^2}{2}, \quad (1.58)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;
 l – довжина ділянки труби або каналу;
 d – діаметр труби;
 V – середня швидкість течії;
 R – гідравлічний радіус;
 $d_{екв}$ – еквівалентний діаметр;
 C – коефіцієнт Шезі, пов'язаний з коефіцієнтом гідравлічного тертя λ залежністю:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}, \quad (1.59)$$

$$\lambda = \frac{8g}{C^2}, \quad (1.60)$$

Розмірність коефіцієнта Шезі – $m^{1/2}/c$.

Зв'язок між коефіцієнтами λ і C подано у додатку П.

Коефіцієнт гідравлічного тертя λ враховує втрату опору по довжині всіх факторів, які не отримали відображення у формулах (1.55 – 1.57), але важливі при визначенні гідравлічних опорів. Важливішими з них є в'язкість рідини, та стан стінок труби.

Для турбулентного та ламінарного руху рідини застосовують різні формули.

Турбулентний рух. При турбулентному русі у напірному трубопроводі круглого перерізу коефіцієнт гідравлічного тертя λ , який входить до формули Дарсі – Вейсбаха залежить від двох параметрів, які не мають розмірності, – числа Рейнольдса та відносної шорсткості $K_{э/d}$, тобто:

$$\lambda = f\left(\text{Re}; \frac{\Delta_{екв}}{d}\right), \quad (1.61)$$

де $\Delta_{екв}$ – еквівалентна рівномірно-зерниста абсолютна шорсткість.

Під еквівалентною рівномірно-зернистою шорсткістю розуміють таку висоту виступів шорсткості, яка складається з піщин однакового розміру та дає при розрахунках за формулою (1.62) однакову з заданою шорсткістю величину λ .

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,5}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta_{\text{екв}}}{3,7d} \right). \quad (1.62)$$

Для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя λ при різних режимах руху рідини у напірних трубах рекомендують наступні формули (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Формули для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя λ при різних режимах руху рідини у напірних трубах

Режим руху		Число Рейнольдса	Формула для визначення коефіцієнту гідравлічного тертя λ
Ламінарний		$\text{Re} < 2300$	$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$
Перехідний		$2300 < \text{Re} < 4000$	Проектування трубопроводів не рекомендується
Турбулентний	1-а область	$4000 < \text{Re} < 10 \frac{d}{\Delta_{\text{екв}}}$	Формула Блазіуса $\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}$ Формула Конакова $\lambda = \frac{1}{(1,81 \cdot \lg \text{Re} - 1,5)^2}$
	2-а область	$10 \frac{d}{\Delta_{\text{екв}}} < \text{Re} < 560 \frac{d}{\Delta_{\text{екв}}}$	Формула Альтшуля $\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}$
	3-а область	$\text{Re} > 560 \frac{d}{\Delta_{\text{екв}}}$	Формула Альтшуля $\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{d} \right)^{0,25}$ Формула Нікурадзе $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{3,71d} \right)$

Приклад 1. Вентиляційна труба $d = 0,1$ м (100 мм) має довжину $l = 100$ м. Визначити тиск, який повинен розвинути вентилятор, якщо витрата повітря $Q = 0,078$ м³/с. Тиск на виході $p = p_{\text{атм}} = 101$ кПа. Місцевих опорів немає. Температура повітря 20 °С.

Розв'язання. Знайдемо швидкість повітря у трубі:

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,078 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,1^2} = 10 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса для потоку повітря у трубі при $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{10 \cdot 0,1}{15,7 \cdot 10^{-6}} = 69000$$

Відносна шорсткість $\Delta_{екв} = 0,2$ мм.

$$\frac{\Delta_{екв}}{d} = \frac{0,2}{100} = 0,002$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{екв}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 (0,002 + 0,001)^{0,25} = 0,0256$$

За формулою (1.58) знайдемо втрати тиску на тертя ($\rho = 1,18$ кг/м³).

$$\Delta p_l = \lambda \frac{l}{d_{екв}} \rho \frac{V^2}{2} = 0,0256 \cdot \frac{100}{0,1} \cdot 1,18 \cdot \frac{10^2}{2} \approx 1410 \text{ Па} = 1,41 \text{ кПа}.$$

Приклад 2. Витрата рідини при температурі 10 °С у трубі кільцевого перерізу, яка складається з двох концентричних оцинкованих сталевих труб (при $\Delta_{екв} = 0,15$ мм), складає $Q = 0,0075$ м³/с. Внутрішня труба має зовнішній діаметр $d = 0,075$ м, а зовнішня труба має внутрішній діаметр $D = 0,1$ м. Знайти втрати тиску на тертя за довжиною труби при $l = 300$ м.

Розв'язання. Площа живого перерізу:

$$\omega = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = \frac{3,14}{4} (0,1^2 - 0,075^2) = 0,0034 \text{ м}^2.$$

Змочений периметр живого перерізу:

$$\chi = \pi (D + d) = 3,14 \cdot (0,1 + 0,075) = 0,55 \text{ м}.$$

Еквівалентний діаметр:

$$d_{екв} = 4R = 4 \frac{\omega}{\chi} = 4 \frac{0,0034}{0,55} = 2,48 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Відносна шорсткість:

$$\frac{\Delta_{екв}}{d_{екв}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{2,48 \cdot 10^{-2}} = 0,0059.$$

Середня швидкість руху:

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,0075}{0,0034} = 2,2 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса при $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6}$ м²/с (вода)

$$Re = \frac{V \cdot d_{екв}}{\nu} = \frac{2,2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{1,21 \cdot 10^{-6}} = 42000$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{екв}}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 \left(0,0059 + \frac{68}{42000} \right)^{0,25} = 0,0284$$

Втрати тиску на тертя за довжиною визначаємо за формулою:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d_{екв}} \cdot \frac{V^2}{2g} = 0,0284 \cdot \frac{300 \cdot 2,2^2}{2,48 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 9,81} = 8,4 \text{ м.}$$

Приклад 3. Визначити витрату води у трубі прямокутного поперечного перерізу з співвідношенням сторін $a : b = 0,25$ і у круглій трубі при тій же площі поперечного перерізу $\omega = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, якщо втрати тиску в цих трубах однакові та рівні $\Delta p_l = 100 \text{ Па}$, а довжина кожної труби $l = 10 \text{ м}$. Температура води 20°C .

Розв'язання. Для труби круглого перерізу $d_{екв} = d$; для труби прямокутного перерізу при $a : b = 0,25$

$$d_{екв} = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b} = 1,6a$$

Еквівалентні діаметри для цих труб:

$$d_{екв}^{круг} = \sqrt{\frac{4\omega}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$d_{екв}^{прямокут} = 1,6 \sqrt{\frac{\omega}{4}} = 1,6 \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-4}}{4}} = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Втрати тиску визначаємо за формулою (1.58). Прийнемо, що рух рідини у трубах ламінарний. Тоді за формулою $\lambda = \frac{A}{\text{Re}}$, де значення коефіцієнта форми A (дивись додаток 17) для круглих труб – 64, для прямокутних – 73.

Формула втрат тиску приймає вид:

$$\Delta p_l = \frac{A}{\text{Re}} \cdot \frac{l}{d_{екв}} \rho \frac{V^2}{2} = \rho \frac{A \cdot l \cdot v}{2d_{екв}^2} V.$$

Для круглої труби при питомій масі води $\rho = 998,2 \text{ кг/м}^3$ (дивись додаток А) та в'язкості $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (дивись додаток Г)

$$V = \frac{\Delta p_l \cdot 2d_{екв}^2}{\rho \cdot A \cdot l \cdot \nu} = \frac{2 \cdot 100 \cdot (1,6 \cdot 10^{-2})^2}{998,2 \cdot 64 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0,08 \text{ м/с.}$$

для прямокутної труби:

$$V = \frac{2 \cdot 100 \cdot (1,1 \cdot 10^{-2})^2}{998,2 \cdot 73 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0,032 \text{ м/с.}$$

Визначимо число Рейнольдса:

– для круглої труби

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d_{екв}}{\nu} = \frac{0,08 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2}}{10^{-6}} = 1280$$

– для прямокутних труб:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d_{екв}}{\nu} = \frac{0,032 \cdot 1,1 \cdot 10^{-2}}{10^{-6}} = 350$$

Оскільки число Рейнольдса менше квадратичного, рівного 2000, режим течії в трубах, як і припускали, ламінарний.

Витрата води:

– у круглій трубі

$$Q = V \cdot \omega = 0,082 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с},$$

– у прямокутній трубі

$$Q = V \cdot \omega = 0,03 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 0,64 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Таким чином, в умовах ламінарного руху при однаковій площі живого перерізу і однакових втратах тиску кругла труба пропускає у 2,5 рази більше води, ніж прямокутна труба.

Приклад 4. Визначити втрати тиску за довжиною у новому сталевому трубопроводі (еквівалентна шорсткість $\Delta_{\text{екв}} = 0,1$ мм) діаметром $d = 200$ мм і довжиною $l = 2$ км, якщо ним транспортують воду з витратою $Q = 20$ л/с. Кінематичний коефіцієнт в'язкості води $\nu = 0,01$ см²/с.

Як зміняться втрати напору, якщо цим же трубопроводом буде транспортуватись нафта з тією ж витратою. Кінематичний коефіцієнт в'язкості нафти $\nu = 1$ см²/с.

Розв'язання. Знайдемо середню швидкість потоку:

Число Рейнольдса при транспортуванні води буде дорівнювати:

$$V = \frac{Q}{\omega} = \frac{20000 \cdot 4}{3,14 \cdot 10^2} = 64 \text{ см/с},$$

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{64 \cdot 20}{0,01} = 128000$$

що відповідає турбулентному потоку.

Визначаємо коефіцієнт гідравлічного тертя за формулою А. Д. Альдшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_{\text{екв}}}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{0,1}{200} + \frac{68}{128000} \right)^{0,25} = 0,0198$$

Втрати тиску:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} = 0,0198 \cdot \frac{2000}{0,2} \cdot \frac{0,64^2}{2 \cdot 9,81} = 4,16 \text{ м вод. ст.}$$

При транспортуванні нафти число Рейнольдса буде:

$$\text{Re}_{\text{наф}} = \frac{V \cdot d}{\nu_{\text{наф}}} = \frac{64 \cdot 20}{1} = 1280$$

Отже, режим руху нафти – ламінарний.

Коефіцієнт гідравлічного тертя:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{1280} = 0,05$$

Втрати тиску за довжиною:

$$h_l = 0,05 \cdot \frac{2000}{0,2} \cdot \frac{0,64^2}{2 \cdot 9,81} = 10,45 \text{ м нафт. ст.}$$

1.12 Місцеві втрати напору у трубах

Місцеві втрати напору обумовлюється подоланням місцевих опорів, які створюються фасонними частинами, арматурою та іншим обладнанням на трубопроводах. Місцеві опори викликають зміну величини та напрямку швидкості руху рідини на окремих ділянках трубопроводу, що пов'язано з появою додаткових втрат напору. Рух у трубопроводі за наявності місцевих опорів є нерівномірним. Втрати напору в місцевих опорах h_m (місцеві втрати напору) визначають за формулою Вейсбаха:

$$h_m = \sum \xi \frac{V^2}{2g}, \text{ м} \quad (1.63)$$

де V – середня швидкість у перерізі, який розташований нижче за течією за опором, м/с;

ξ – безрозмірний коефіцієнт місцевого опору.

Для визначення втрат тиску Δp_m формула (1.63) приймає вигляд:

$$p_m = \sum \xi \rho \frac{V^2}{2g}, \text{ м.} \quad (1.64)$$

Значення коефіцієнтів місцевих опорів залежать від конфігурації місцевого опору і режиму руху. Цей режим визначається коефіцієнтом гідравлічного тертя λ , тобто числом Рейнольдса і відносною шорсткістю. Залежність коефіцієнтів місцевих опорів від числа Рейнольдса не постійна і у практичних розрахунках нею часто можна знехтувати. Більш значний вплив чисел Рейнольдса відчувається за невеликих їх значень, а також у разі постійної зміни величини або напрямку швидкості (закруглений поворот, плавний вхід до труби).

Наведені далі значення коефіцієнтів опору відносяться до квадратичної області опорів.

Раптове розширення трубопроводу. Втрати напору при раптовому розширенні знаходять за формулою Борда:

$$h_{\text{рапт.розш.}} = \frac{\alpha_0 \cdot (V_1 - V_2)^2}{2g}, \text{ м.} \quad (1.65)$$

де α_0 – коефіцієнт кореляції, який представляє відношення дійсної кінетичної енергії потоку в даному перерізі до кінетичної енергії того ж потоку в тому ж перерізі, але у разі рівномірного розподілу швидкості, дорівнює 1,035;

V_1 і V_2 – середні швидкості руху до і після розширення.

Таким чином, втрата напору при раптовому розширенні трубопроводу дорівнює швидкісному напору від втраченої швидкості.

Раптове звуження трубопроводу. Коефіцієнт місцевого опору при раптовому звуженні:

$$\xi_{\text{рапт.звуж.}} = \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right)^2, \text{ м.} \quad (1.66)$$

де ε – коефіцієнт стискання струменя, який являє собою співвідношення площі перерізу стислого струменя у вузькому трубопроводі $\omega_{ст.}$ до площі перерізу вузької труби ω_2 (рис. 1.19)

$$\varepsilon = \frac{\omega_{ст.}}{\omega_2} \quad (1.66)$$

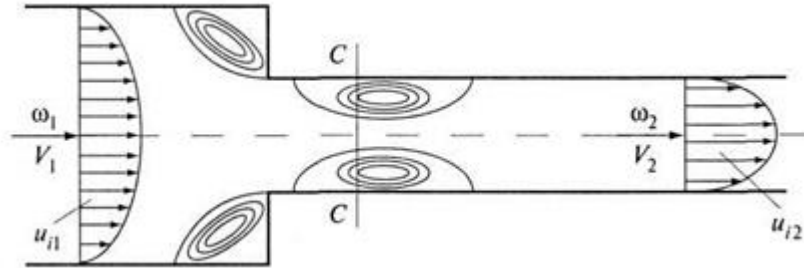


Рисунок 1.19 – Раптове звуження трубопроводу

Коефіцієнт стискання залежить від ступені стискання потоку:

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (1.67)$$

Значення коефіцієнту стискання залежно від співвідношення площ перерізів наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнту стискання залежно від співвідношення площ перерізів

n	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
ε	0,609	0,613	0,618	0,623	0,631	6,42	0,656	0,678	0,713	0,785	1

Діафрагма на трубопроводі (рис. 1.20). Коефіцієнт місцевого опору діафрагми, розташованої всередині труби постійного перерізу.

$$\xi_{\text{диафр}} = \left(\frac{1}{n \cdot \varepsilon} - 1 \right)^2, \text{ м.} \quad (1.68)$$

де $n = \omega_o/\omega$ – відношення площі отвору діафрагми ω_o до площі перерізу труби ω .

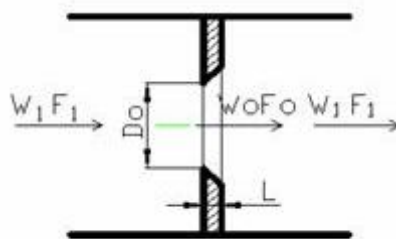


Рисунок 1.20 – Діафрагма на трубі постійного перерізу

Вхід в трубу з резервуара. Для коефіцієнта опору належить приймати наступні значення:

- при гострих краях $\xi_{\text{вх\iд}} = 0,4 \div 0,5$;
- при закруглених краях $\xi_{\text{вх\iд}} = 0,2$;
- при плавному вході $\xi_{\text{вх\iд}} = 0,05$.

Поступове розширення трубопроводу (дифузор). Коефіцієнт опору для труб, які конусно розходяться (дифузор), залежить від кута конусності та співвідношення діаметрів. Для коротких конусів коефіцієнт опору, відносний до широкого перерізу, знаходимо за формулою:

$$\xi_{\text{диф}} = k_{\text{диф}} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2, \text{ м.} \quad (1.69)$$

де $k_{\text{диф}}$ – коефіцієнт зм'якшення при поступовому розширенні, який залежить від кута конусності α (рис. 1.21), значення можна знайти у гідравлічному довіднику.

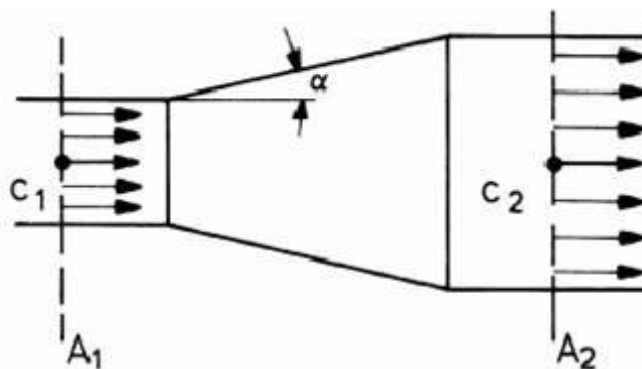


Рисунок 1.21 – Поступове розширення трубопроводу.

Для довгих конусів треба враховувати втрати опору за довжиною.

Поступове звуження трубопроводів. Коефіцієнт опору для перехідних конусів, які сходяться (конфузори) залежить від кута конусності та співвідношення діаметрів. Для коротких конусів його розраховують за формулою:

$$\xi_{\text{конф}} = k_{\text{конф}} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \text{ м.} \quad (1.70)$$

де $k_{\text{конф}}$ – коефіцієнт зм'якшення при поступовому звуженні, який залежить від кута конусності α ; значення $k_{\text{конф}}$ наведені у гідравлічному довіднику.

Приклад 1. В якості нагрівальних приборів систем опалення використовують сталі труби $d_1 = 0,1$ м. Стояк, який підводить нагріту воду, і з'єднувальні лінії виконані з труб $d_2 = 0,025$ м і зварені з торцями нагрівальних труб (рис. 1.22). Визначити втрати тиску при раптовому розширенні трубопроводів, якщо швидкість руху гарячої води у з'єднувальних трубах $V = 0,3$ м/с, а температура води 80°C .

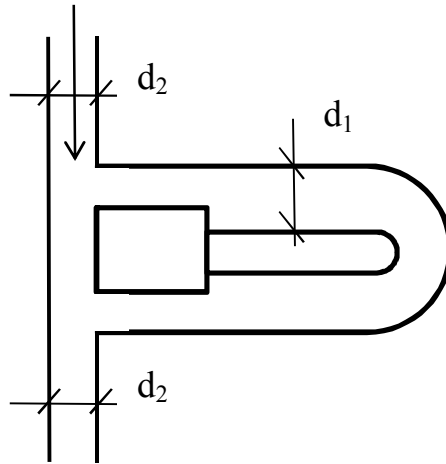


Рисунок 1.22 – Схема трубопроводів системи опалення до прикладу 1

Розв'язання. Кінетична в'язкість та питома маса води $\nu = 0,37 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\rho = 972 \text{ кг/м}^3$ при кімнатній температурі.

Число Рейнольдса у трубах які підводять воду дорівнює:

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d_2}{\nu} = \frac{0,3 \cdot 0,025}{0,37 \cdot 10^{-6}} \approx 20000.$$

Втрати тиску необхідно за формулою Борда:

$$\Delta p = \frac{V_1^2}{2} \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \rho = \frac{0,3^2}{2} \left(1 - \frac{0,025}{0,1}\right)^2 \cdot 972 = 41,8 \text{ Па}.$$

Приклад 2. Для обмеження витрати води на водопровідній лінії установлюють діафрагму. Надлишковий тиск у трубі до і після діафрагми сталий і дорівнює $p_1 = 6,37 \cdot 10^4 \text{ Па}$ та $p_2 = 2,05 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Діаметр труби $D = 0,076 \text{ м}$. Визначити необхідний діаметр отвору діафрагми d з таким розрахунком, щоб витрата води в лінії дорівнювала $Q = 0,0059 \text{ м}^3/\text{с}$.

Розв'язання: Втрати напору в діафрагмі

$$h = \frac{p_1 - p_2}{\rho \cdot g} = \frac{6,37 \cdot 10^4 - 2,05 \cdot 10^4}{998,2 \cdot 9,8} = 4,4 \text{ м}.$$

Швидкість води у трубі:

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,0059}{3,14 \cdot 0,076^2} = 1,28 \text{ м/с}.$$

З формули Вейсбаха:

$$h = \Sigma \xi \frac{V^2}{2g},$$

маємо:

$$\xi_{\text{diaф}} = \frac{2gh}{V^2} = \frac{2 \cdot 9,8 \cdot 4,4}{1,28^2} = 52,3.$$

Цьому значенню коефіцієнта опору ξ відповідає співвідношення:

$$n = \frac{d^2}{D^2},$$

яке можливо визначити за формулою:

$$\xi_{\text{diaф}} = \left(\frac{1}{n\varepsilon} - 1 \right)^2 = 52,3,$$

де коефіцієнт стискання струменя визначаємо за формулою:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n}.$$

Таким чином:

$$\left[\frac{1}{n \cdot \left(0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n} \right)} + 1 \right]^2 = 52,3;$$

$$\frac{1}{n \cdot \left(0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n} \right)} = 7,4 + 1 = 8,4;$$

$$1 = 4,79n + \frac{0,361}{1,1 - n};$$

$$n^2 - 1,32n + 0,23 = 0;$$

$$n = 0,66 - \sqrt{0,435 - 0,23} = 0,205.$$

Находимо діаметр отвору діафрагми:

$$d = D\sqrt{h} = 0,076\sqrt{0,205} = 0,0345 \text{ м.}$$

Коефіцієнт стискання струмени:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - 0,205} = 0,618.$$

Приклад 3. Вода протікає по горизонтальній трубі, яка раптово звужується від $d_1 = 0,2$ м до $d_2 = 0,1$ м. Витрата води $Q = 0,002$ м³/с. Визначити яку різницю рівнів ртуті $h_{\text{рт}}$ покаже диференціальний манометр включений у місті зміни перерізу. Температура води 20 °С.

Розв'язання: Швидкість води в широкому перерізі труби:

$$V_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,002}{3,14 \cdot 0,2^2} = 0,69 \text{ м/с.}$$

Швидкість води у вузькому перерізі труби:

$$V_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 \cdot 0,002}{3,14 \cdot 0,1^2} = 2,82 \text{ м/с.}$$

Ступінь стискання трубопроводу:

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} = \frac{0,1^2}{0,2^2} = 0,25.$$

Коефіцієнт стискання струмини визначаємо за формулою:

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n} = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - 0,25} = 0,62.$$

Коефіцієнт місцевого опору при раптовому звуженні визначаємо:

$$\xi_{\text{рапт. зв.}} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1}{0,62} - 1 \right)^2 = 0,37.$$

Рівняння Бернуллі для перерізи в 1–1 та 2–2 і площини порівняння, яка співпадає з віссю труби:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + \xi_{\text{рапт. зв.}} \frac{V_2^2}{2}.$$

Різниця п'єзометричних напорів:

$$H = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} + \xi_{\text{рапт. зв.}} \frac{V_2^2}{2g} = \frac{2,82^2}{19,6} - \frac{0,69^2}{19,6} + 0,37 \frac{2,82^2}{19,6} = 0,529 \text{ м.}$$

Показання ртутного манометра $h_{\text{рт}}$

$$h_{\text{рт}} = \frac{H \cdot \rho_{\text{води}}}{\rho_{\text{рт}} - \rho_{\text{води}}} = \frac{0,529 \cdot 998,2}{13550 - 998,2} = 42,5 \text{ мм рт. ст.}$$

Приклад 4. Горизонтальна труба діаметром $d_1 = 0,1$ м раптово переходить у трубу діаметром $d_2 = 0,15$ м. Втрата води $Q = 0,03$ м³/с.

Визначити:

- а) втрати напору при раптовому розширенні труби;
- б) різницю тиску в обох трубах;
- в) втрати напору і різницю тиску у випадку, коли вода буде текти у протилежному напрямку (тобто з широкої труби в вузьку);
- г) різницю тиску при поступовому розширенні труби (знехтувавши втратами напору).

Розв'язання:

а) Визначимо втрати напору при раптовому розширенні трубопроводу за формулою Борда:

$$h_{\text{роз}} = \frac{\alpha_0 (V_1 - V_2)^2}{2g},$$

$$V_1 = \frac{Q}{\omega_1} = \frac{0,03 \cdot 4}{3,14 \cdot 10^{-2}} = 3,84 \text{ м/с},$$

$$V_2 = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 V_1 = \left(\frac{0,1}{0,15} \right)^2 \cdot 3,84 = 1,75 \text{ м/с},$$

$$h_{\text{роз}} = \frac{1,035 \cdot (3,84 - 1,75)^2}{2 \cdot 9,81} = 0,23 \text{ м.}$$

б) Знайдемо різницю тисків у вузькій і широкій трубах з рівняння Бернуллі:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{\text{роз.}},$$

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} - h_{\text{роз.}},$$

або:

$$p_2 - p_1 = \frac{\rho(v_1^2 - v_2^2)}{2} - h_{\text{пант.род.}} \rho g,$$

$$p_2 - p_1 = \frac{998,2 \cdot (3,84^2 - 1,75^2)}{2} - 0,23 \cdot 998,2 \cdot 9,8 = 3245 \text{ Па.}$$

в) При зміні напрямлення руху на зворотній, з широкої труби у вузьку швидкість у стислому перерізі:

$$V_{\text{ст}} = \frac{\omega_1}{\omega_{\text{ст}}} V_1 = \frac{V_1}{\varepsilon}.$$

Ступінь стискання потоку:

$$n = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{0,1^2}{0,15^2} = 0,444.$$

Коефіцієнт стискання потоку за формулою

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1 - n} = 0,64,$$

$$h_{\text{пант.зв.}} = \frac{(V_{\text{ст}} - V_1)^2}{2g} = \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{\omega_1}{\omega_{\text{ст}}} - 1 \right)^2 = \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 = \frac{3,82^2}{2 \cdot 9,81} \left(\frac{1}{0,64} - 1 \right)^2 = 0,23 \text{ м.}$$

Різницю тиску

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + h_{\text{пант.зв.}} = 0,595 + 0,23 = 0,82 \text{ м,}$$

$$p_2 - p_1 = 800 \text{ Па.}$$

г) Якщо забезпечити плавний перехід від вузького перерізу до широкого перерізу, то різниця тиску буде:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} = \frac{10,86}{2 \cdot 9,81} = 0,595 \text{ м.}$$

Задачі для розв'язання

Задача 1. Визначити втрати тиску у водяному тракті водопідігрівача, який виконаний у вигляді шестипетльового трубчатого сталюого змієвика

(рис. 1.23). Діаметр труб $d = 0,075$ м; довжина прямої ділянки $L = 3$ м; петлі з'єднуються круговими колінами, які мають радіуси $R = 0,1$ м. Витрата води $Q = 0,01$ м³/с, температура 90 °С.

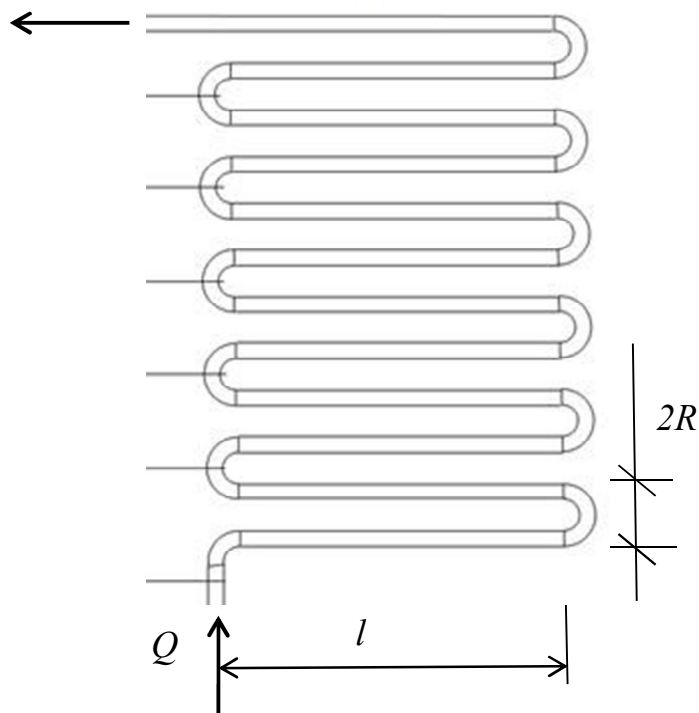


Рисунок 1.23 – Схема змійовика до задачі 1

Задача 2. Насос забирає з водойми воду з температурою 20 °С у кількості $Q = 50$ л/с. Визначити максимальну висоту розташування горизонтального валу насоса над вільною поверхнею води H (рис. 1.24). Якщо тиск перед насосом $P_2 = 0,3 \cdot 10^5$ Па. На всмоктуючій чавунній трубі діаметром $d = 0,25$ м і довжиною $L = 50$ м є фільтруюча сітка, плавний поворот радіусом $R = 0,5$ м та регулююча засувка, відкрита на 45 % площі прохідного перерізу.

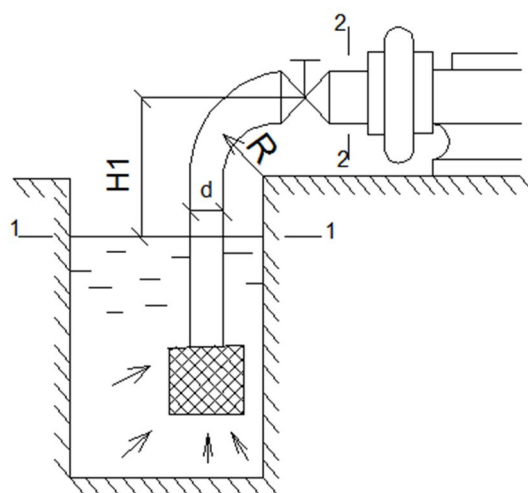


Рисунок 1.24 – Схема установки поверхневого насосу

Задача 3. Витрата гарячої води з температурою 95 °С через радіатор водяного опалення (рис. 1.25) $Q = 0,1$ м³/с. Визначити втрати тиску між перерізами 1–1 та 2–2. Якщо діаметр підвідних трубопроводів $d = 0,0125$ м, а

загальна їх довжина $L = 5$ м.

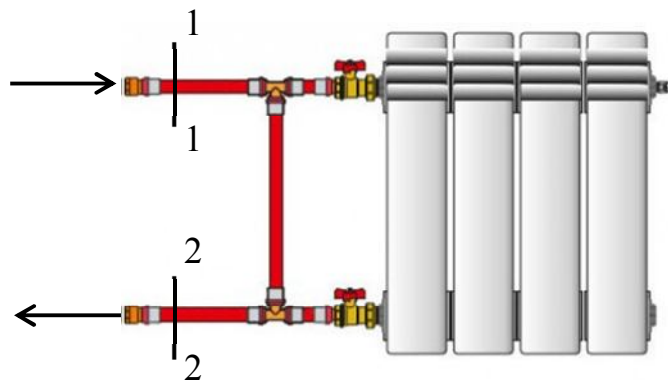


Рисунок 1.25 – Схема радіатора водяного опалення до задачі 3

Задача 4. Визначити початкову довжину ділянки (L_n) сталюгого трубопроводу діаметром $d = 0,2$ м. Витрата води $Q = 0,15$ м³/с, температура 20 °С.

Задача 5. Насос з витратою $Q = 0,01$ м³/с забирає воду з колодязя, який сполучається з водоймищем чавунною трубою $d = 150$ мм і довжиною $L = 100$ м (рис. 1.26). На вході у трубу стоїть сітка. Температура води у водоймищі 20 °С. Знайти перепад рівнів води Δh у водоймі та колодязі.

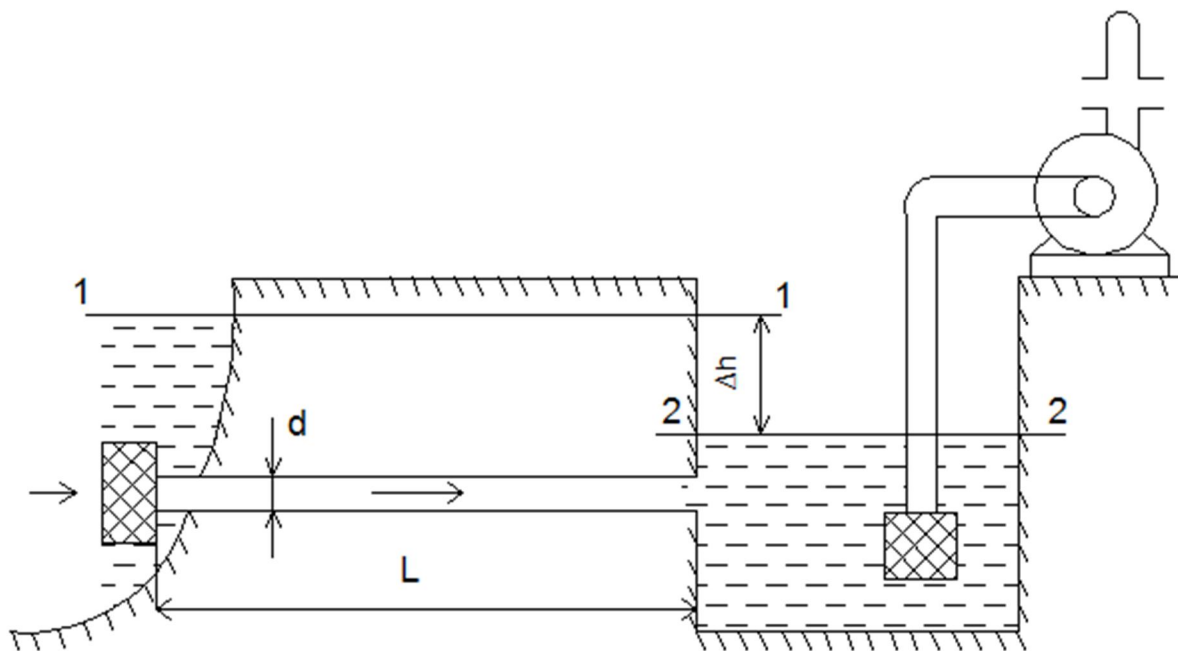


Рисунок 1.26 – Схема забору води з колодязя насосом до задачі 5

Задача 6. В трубі діаметром 150 мм тече масло, кінематична в'язкість якого $\nu = 1,6$ см²/с, а питома маса $\rho = 900$ кг/м³. Витрати масла $Q = 30$ л/с. Перевірити, чи режим руху ламінарний. Підрахувати максимальну швидкість течії і втрати тиску на одиницю довжини труби.

Задача 7. Похилою трубою, яка має раптове розширення від діаметра $d_1 = 5$ см до $d_2 = 10$ см тече вода. Відмітки вільної поверхні у п'єзометричних трубках до розширення $(z_1 + P_1/\gamma) = 0,4$ м і після розширення $-(z_1 + P_1/\gamma) = 0,7$ м. Визначити витрату води.

Задача 8. По трубопроводу постійного діаметра $d = 150$ мм і довжиною $L = 25$ м тече вода в кількості $Q = 40$ л/с і витікає в атмосферу. Визначити, під яким напором відбувається витікання.

Задача 9. При якому режимі буде текти вода з температурою 15 °C:

- а) у круглій напірній трубі діаметром $d = 250$ мм, якщо витрата $Q = 2$ л/с;
- б) у відкритому прямокутному руслі при $Q = 1$ м³/с, глибина $h = 0,8$ м та $b = 0,7$ м.

Задача 10. Визначити витрату води при $t = 5$ °C у трубі діаметром 50 мм, при якому зміниться режим руху.

Задача 11. Чи зміниться режим руху потоку з витратою $Q = 0,042$ л/с у круглій трубі діаметром 25 мм, якщо температура підвищиться з 5 °C до 45 °C?

Задача 12. Чи можлива зміна режиму руху від ламінарного до турбулентного, якщо рідина рухається з постійною витратою Q по кінцевому трубопроводу, який звужується?

Задача 13. Визначити максимальний діаметр трубопроводу, у якому нафта при $t = 15$ °C буде текти при ламінарному режимі з витратою $Q = 8$ л/с. Коефіцієнт кінематичної в'язкості нафти $\nu = 0,3$ см²/с.

Задача 14. Визначити критичну швидкість під час руху води і повітря по трубі $d = 0,01$ м при температурі $t = 20$ °C коефіцієнт кінематичної в'язкості для води $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, для повітря $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Задача 15. Визначити коефіцієнт вентиля, поставленого наприкінці трубопроводу з діаметром $d = 50$ мм, якщо показання манометра перед вентилям $P_m = 3,7$ кПа, а витрата води $Q = 2,5$ л/с.

Запитання для самоперевірки

1. Який рух називають рівномірним?
2. Запишіть вираз для залежності λ від Re у випадку ламінарного руху.
3. Коротко опишіть механізм турбулентного руху.
4. Як записується рівняння Бернуллі для потоку в'язкої рідини?
5. Наведіть приклади практичного застосування рівняння Бернуллі.
6. Що таке ламінарний і турбулентний режим руху рідини?

7. Як залежать втрати енергії від швидкості при ламінарному і турбулентному русі?
8. Які Ви знаєте основні формули для визначення гідравлічного коефіцієнта тертя в області турбулентного режиму?
9. Як записуються формули Дарсі–Вейсбаха, Вейсбаха, Шезі?
10. Що таке місцевий опір, на що витрачається енергія потоку в ньому?
11. Як визначити місцеві втрати напору при раптовому розширенні та звуженні потоку?
12. Як експериментально визначити втрату опору?
13. Запишіть формулу Шезі для середньої швидкості та витрати при рівномірному русі.
14. Які формули для визначення коефіцієнта Шезі використовують у розрахунках?
15. Які значення чисел Рейнольдса характеризують кордони областей опору при турбулентному русі у трубах промислового виготовлення?
16. Від яких факторів залежать значення коефіцієнтів місцевих опорів?
17. Поясніть поняття «коефіцієнт опору системи».

2. РОЗРАХУНКОВО–ГРАФІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Задачею для розрахунково–графічного завдання студентам передбачена задача визначення сили тиску на плоску чи криволінійну поверхню.

Вихідні дані наведені нижче.

ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВО–ГРАФІЧНОГО ЗАВДАННЯ

Задача 1

Прямокутна ($b \cdot d$), квадратна ($d \cdot d$) або кругла ($\phi \cdot d$) кришка люка закриває отвір в плоскій похилій стінці водойми (рис. 2.1).

Знайти силу тиску води на кришку, а також відстань до центру тиску Y_d .
Щільність води – 1000 кг/м^3 .

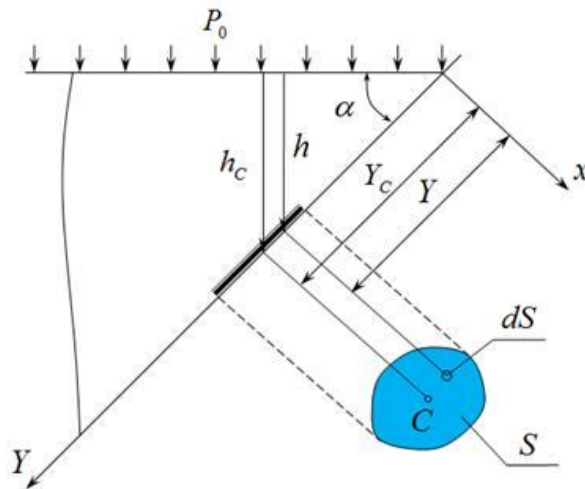


Рисунок 2.1 – Схема похилої стінки до задачі 1

Задача 2

Побудувати епюру гідростатичного тиску на бокову стінку резервуару (рис. 2.2). Визначити силу тиску води на затвор, який знаходиться на глибині H , м. Показати центр тиску.

Вихідні дані:

- 1) для прямокутного затвору $H = 2,5 \text{ м}$, $h = 0,8 \text{ м}$, $b = 0,4 \text{ м}$;
- 2) для круглого затвору $H = 3,7 \text{ м}$, $d = 0,4 \text{ м}$;
- 3) для квадратного затвору $H = 1,7 \text{ м}$, $a = 0,9 \text{ м}$;

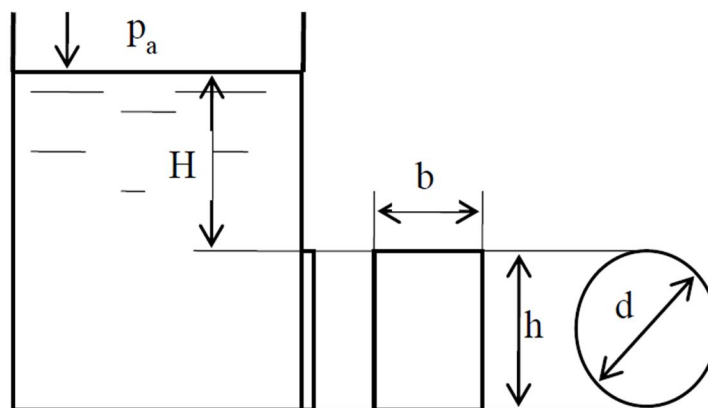


Рисунок 2.2 – Схема резервуару до задачі 2

Задача 3

Прямокутний резервуар розділений стінкою на два відсіки (рис. 2.3). Глибина води у першому відсіку $H_1 = 1,5$ м, у другому відсіку $H_2 = 0,9$ м, ширина резервуара $b = 1,2$ м. Визначити сили тиску P_1 та P_2 , які діють зліва та справа і точки їх прикладення, а також величину рівнодіючої цих сил і точку її прикладення.

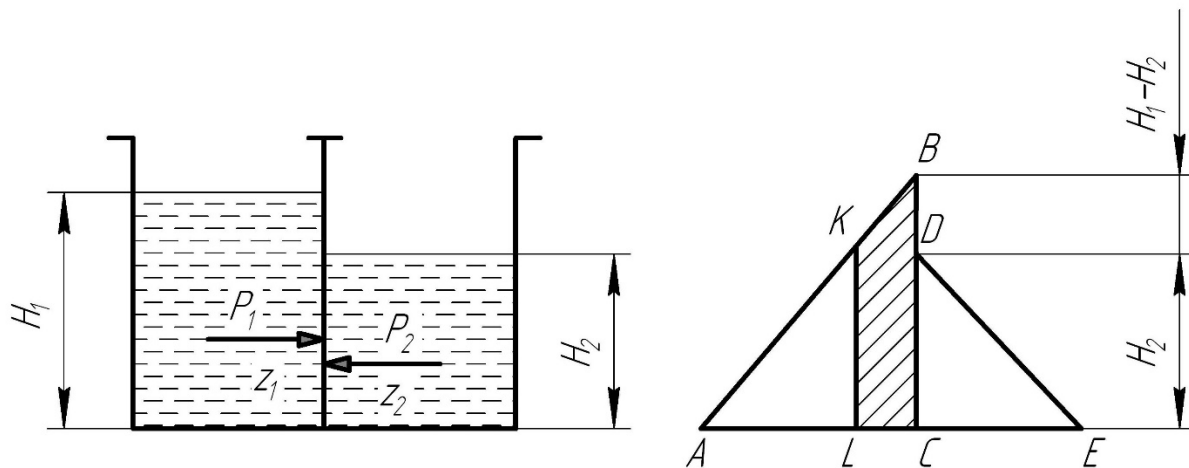


Рисунок 2.3 – Схема резервуару до задачі 3

Задача 4

Визначити зусилля P , яке діє на кришку, що закриває круглий люк діаметром $D = 500$ мм у посудині, наповненій рідиною, щільність якої $\rho = 1050$ кг/м³ і висотою рідини центром люка $h = 2,2$ м, $P_0 = 0,7$ МПа (рис. 2.4).

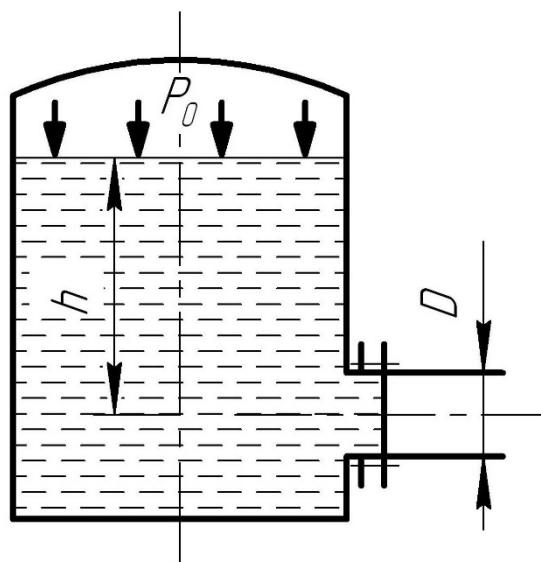


Рисунок 2.4 – Схема резервуару до задачі 4

Задача 5

Замкнутий резервуар з нафтою (рис. 2.5) розділений на два відсіки плоскою перегородкою. Тиск над нафтою у лівому відсіку надлишковий і дорівнює $p_M = 60$ кПа, а в правому відсіку вакуум $p_{\text{вак}} = 9,5$ кПа. Знайти силу тиску нафти на перегородку і точку прикладення (центр тиску) цієї сили. Рівень нафти в лівому відсіку $h_1 = 6$ м, різниця рівнів $h = 4$ м, ширина перегородки $b = 2,2$ м.

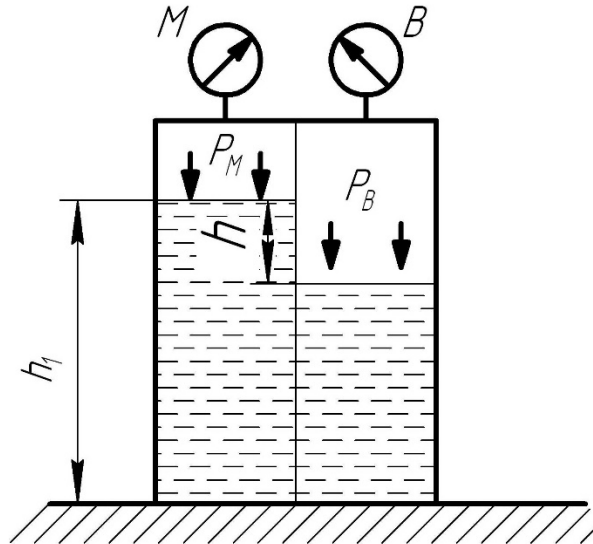


Рисунок 2.5 – Схема резервуару до задачі 5

Задача 6

Визначити силу P , яка відкриває кришку, виконану у вигляді напівциліндру, що закриває отвір розміром $d = 0,8$ м, в стінці, яка нахилена під кутом 45° до горизонту (рис. 2.6). Вільна поверхня води розташована на висоті $H = 4,1$ м над центром отвору.

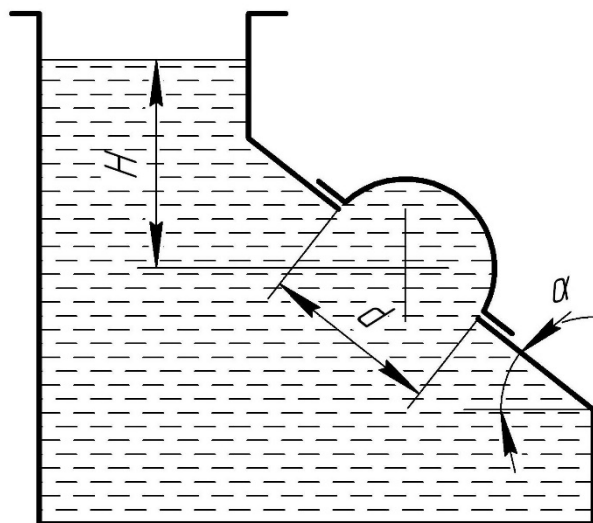


Рисунок 2.6 – Схема резервуару до задачі 6

Задача 7

Визначити горизонтальну, вертикальну складові сили тиску на циліндричну поверхню ABC (рис. 2.7). Вихідні дані: $H = 5,1$ м, $r = 1,4$ м, довжина утворюючої циліндру $L = 3,2$ м.

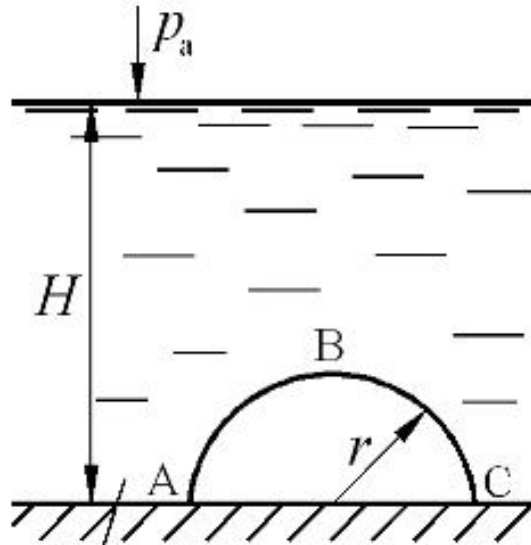


Рисунок 2.7 – Схема резервуару до задачі 7

Задача 8

Визначити силу тиску на циліндричну поверхню BCD (рис. 2.8), якщо глибина води $h = 2,1$ м; $H = 5,4$ м; довжина утворюючої циліндра $L = 2,2$ м.

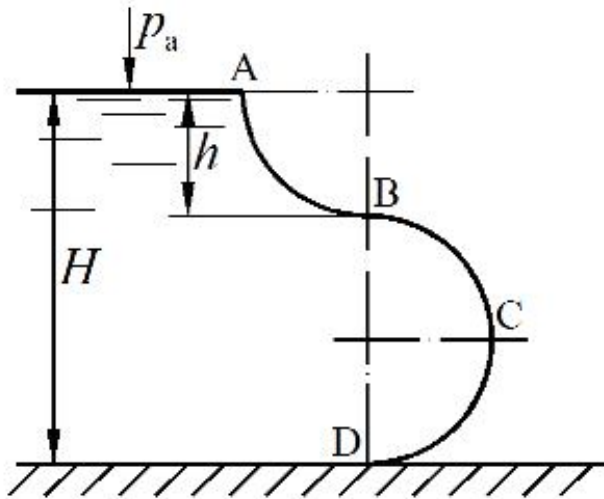


Рисунок 2.8 – Схема резервуару до задачі 8

Задача 9

Визначити силу тиску на поверхню BC (рис. 2.9), якщо $h = 1,7$ м; $r = 0,7$ м; довжина стінки $L = 1,8$ м.

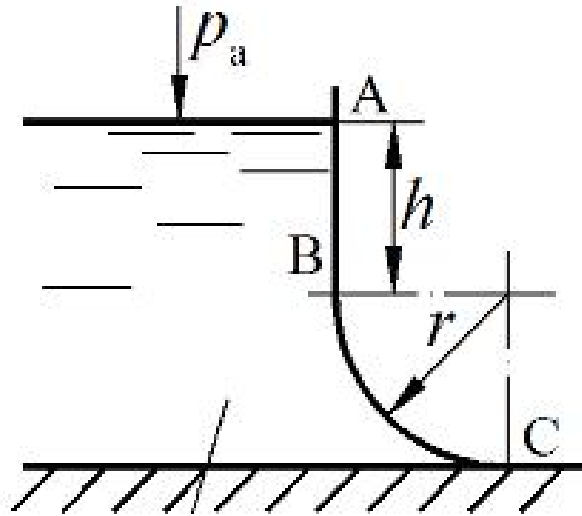


Рисунок 1.9 – Схема резервуару до задачі 9

Задача 10

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню (рис. 2.10). Визначити центр тиску.

Дано: $h_1 = 1$ м; $h_2 = 3$ м; $H = 6$ м; $L = 3$ м; $p_0^{\text{ман}} = 29,43$ кПа.

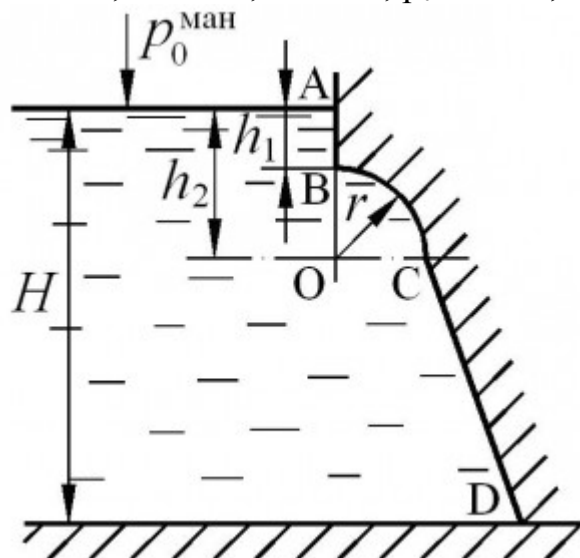


Рисунок 2.10 – Схема резервуару до задачі 10

Задача 11

Знайти силу і центр тиску на стінку AB (рис. 2.11).

Знайти силу і центр тиску на стінку BCD.

Вихідні дані: $h = 2$ м; $r = 3$; $L = 1$ м.

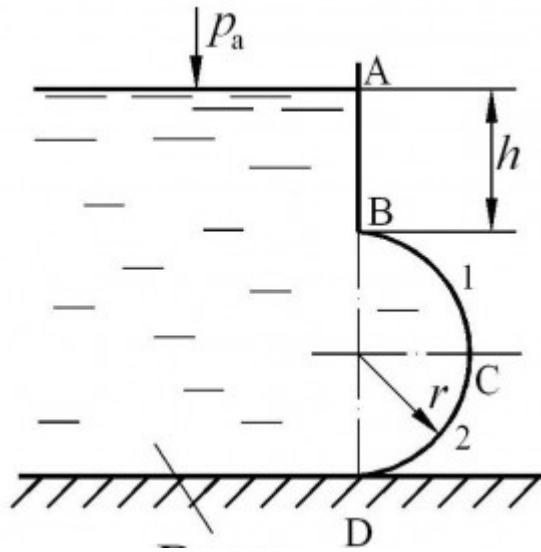


Рисунок 2.11 – Схема резервуару до задачі 11

Задача 12

Знайти силу і центр тиску на стінку BC (рис. 2.12).

Ширина стінки $B = 1$ м; $H = 10$ м; $R = 3$ м.

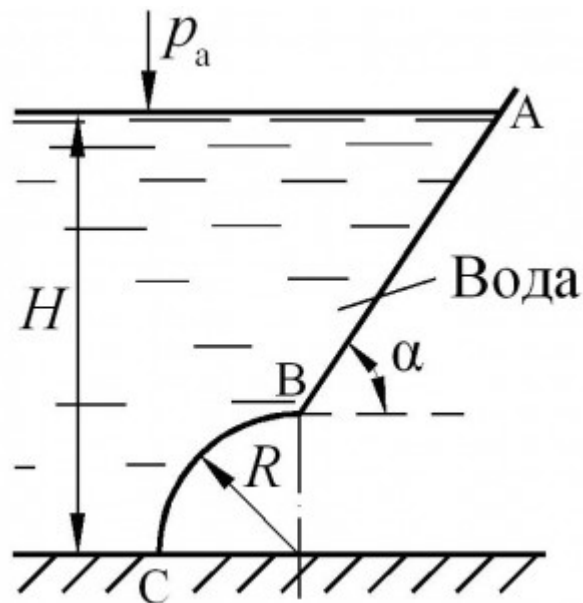


Рисунок 2.12 – Схема резервуару до задачі 12

Задача 13

Визначити горизонтальну, вертикальну складові сили тиску на циліндричну поверхню ABC (рис. 2.13).

Вихідні дані: $H = 1,2$ м; $r = 0,5$ м; довжина утворюючої циліндра $L = 1$ м.

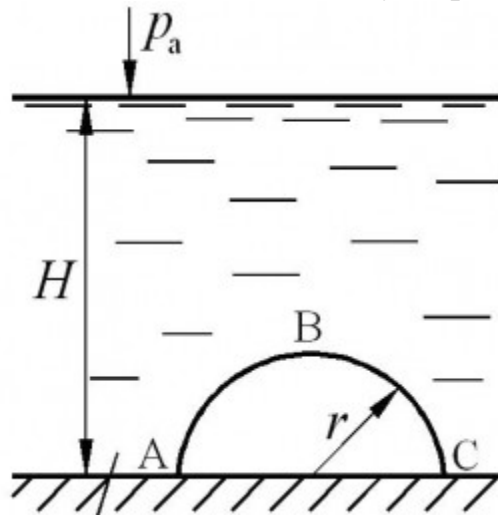


Рисунок 2.13 – Схема резервуару до задачі 13

Задача 14

Знайти силу і центр тиску на поверхню BC (рис. 2.14), якщо $H = 4$ м; $R = 1,5$ м; $L = 1$ м.

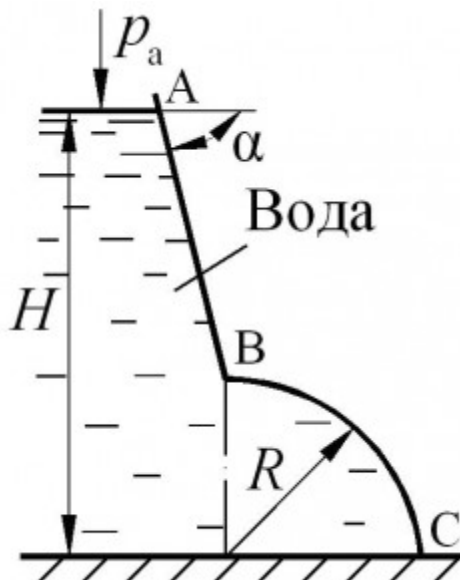


Рисунок 2.14 – Схема резервуару до задачі 14

Задача 15

Визначити силу, яка діє на поверхню BCD (рис. 2.15) і центр тиску, якщо $h = 4$ м; $r = 2$ м; $L = 2$ м.

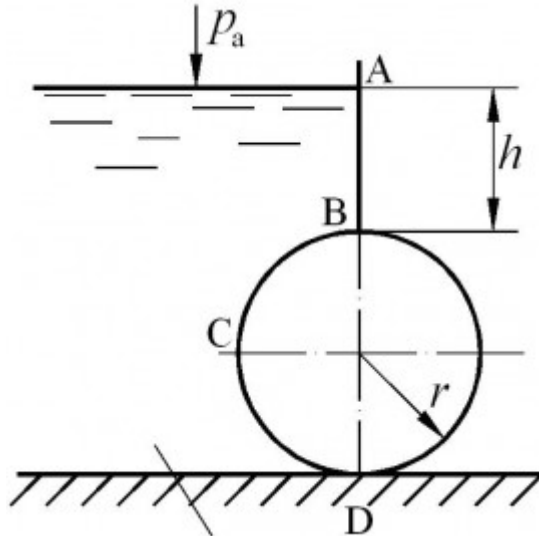


Рисунок 2.15 – Схема резервуару до задачі 15

Задача 16

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню АВ (рис. 2.16). Дано: $h_1 = 2$ м; $h_2 = 3$ м; $H = 8$ м; $b = 2$ м.

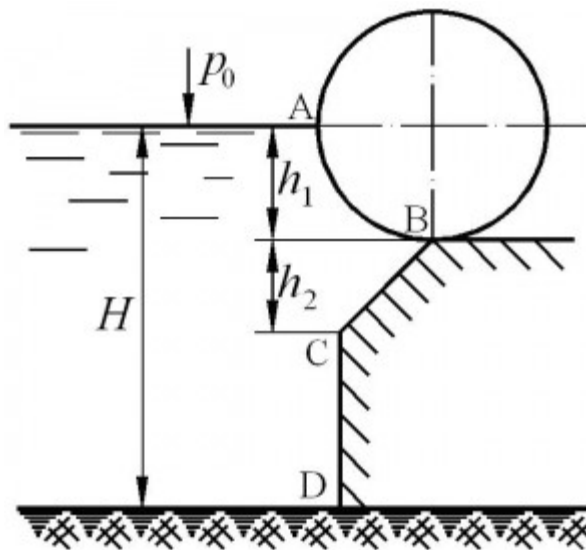


Рисунок 2.16 – Схема резервуару до задачі 16

Задача 17

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню BCD (рис. 2.17). Дано: $h_1 = 2$ м; $H = 6$ м; $L = 4$ м.

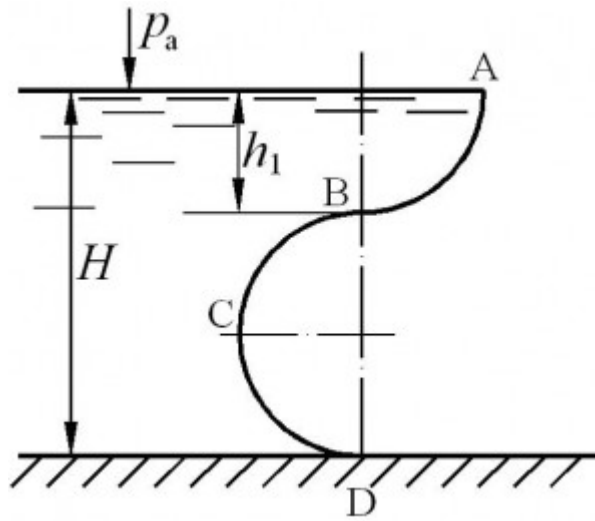


Рисунок 2.17 – Схема резервуару до задачі 17

Задача 18

Розрахувати величину повного гідростатичного тиску на контур ABCDE (рис. 2.18).

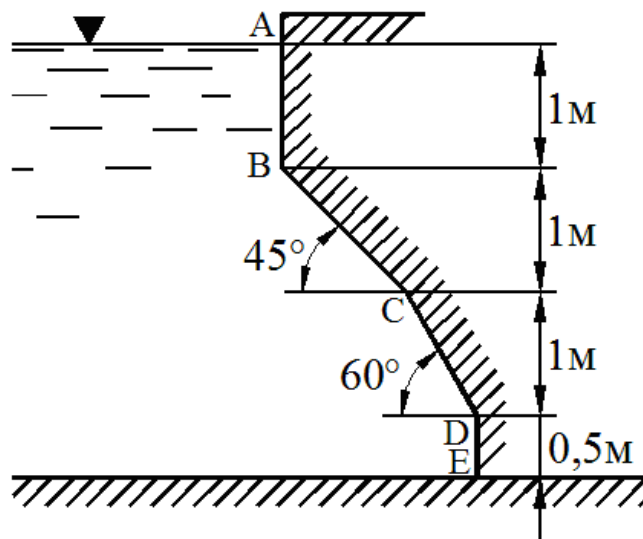


Рисунок 2.18 – Схема резервуару до задачі 18

Задача 19

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню CD (рис. 2.19), якщо глибини $h_1 = 2$ м; $h_2 = 6$ м; довжина утворюючої циліндра $L = 2$ м.

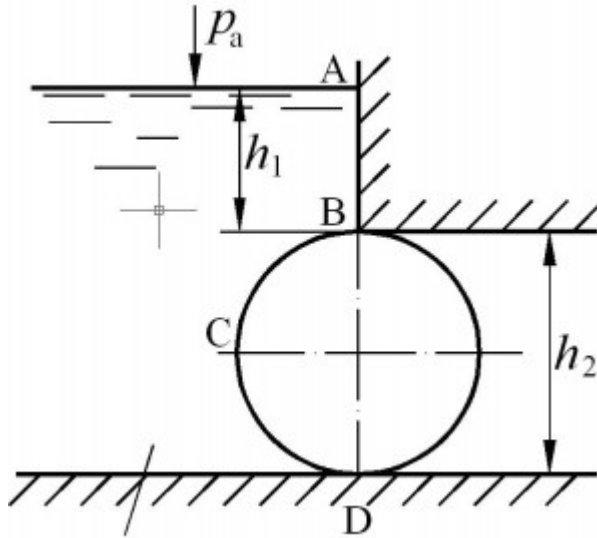


Рисунок 2.19 – Схема резервуару до задачі 19

Задача 20

Знайти силу і центр тиску на стінку AB.

Знайти силу і центр тиску на стінку BC.

Ширина стінки $B = 1,5$ м; $H = 3$ м; $R = 0,5$ м; $\alpha = 30^\circ$; $p_0^{\text{ман}} = 32,24$ кПа.

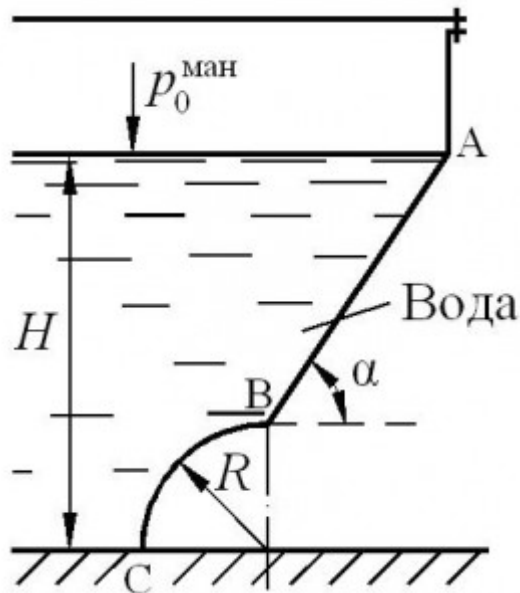


Рисунок 2.20 – Схема резервуару до задачі 20

Задача 21

Визначити силу тиску на напівсферу (рис. 2.21), якщо $r = 2$ м, $p_0^{\text{ман}} = 98,1$ кПа.

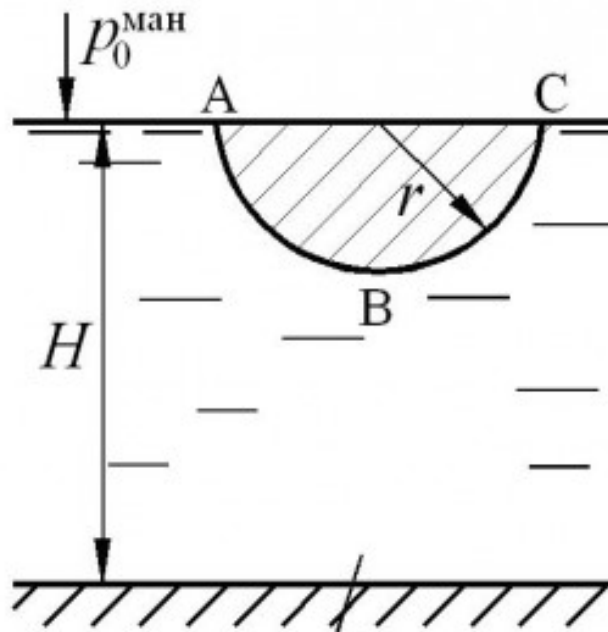


Рисунок 2.21 – Схема резервуару до задачі 21

Задача 22

Визначити силу гідростатичного тиску води на циліндричну поверхню ABC (рис. 2.22), якщо $h = 4$ м, $r = 2$ м, довжина утворюючої циліндра $L = 3$ м.

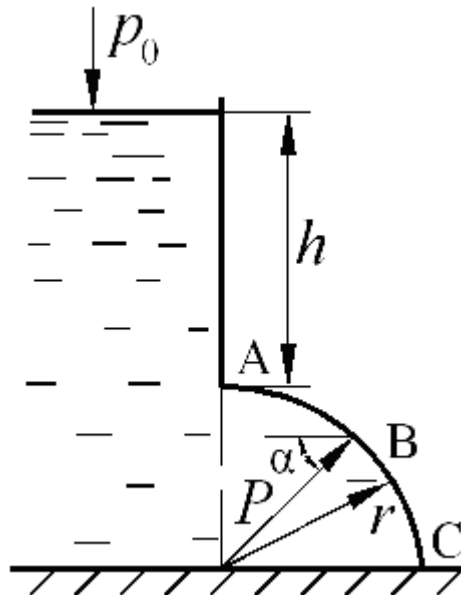


Рисунок 2.22 – Схема резервуару до задачі 22

3 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота № 1 *Дослідження режимів руху в круглій трубі*

Загальні відомості

При протіканні рідини в трубах і каналах мають місце два різних режими руху – ламінарний і турбулентний.

Рух рідини, при якому відсутні зміни місцевих швидкостей, що приводять до перемішування рідини, називають **ламінарним**. Це рух без пульсації швидкості.

Рух рідини, при якому відбувається зміна місцевих швидкостей, що приводять до перемішування рідини, називають **турбулентним**.

Ламінарний режим переважно спостерігається, коли рухається рідина підвищеної в'язкості (нафта, бітум, мазут), а також при рухові через тонкі (капілярні) трубки, наприклад, при рухові води у порах ґрунту.

В інженерній практиці при рухові води або інших рідин, які мають таку ж в'язкість, як гас, спирт, має місце турбулентний режим. У системах водопостачання, водовідведення (каналізація), у каналах і річках також має місце турбулентний режим руху.

На практиці як критерій режиму руху використовують число Рейнольдса, що має позначення **Re**. Число Рейнольдса – це безрозмірний комплекс наступних величин: V , l , ν ,

де V – середня швидкість руху потоку рідини;

l – деякий геометричний розмір живого перетину потоку;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини.

При напірному русі в круглій трубі число Рейнольдса виражається через діаметр труби за формулою:

$$Re = \frac{Vd}{\nu}. \quad (3.1)$$

Безрозмірне число Re характеризує відношення сил інерції до сил тертя (в'язкості) при рухові рідини. Чим більше число Рейнольдса, тим більше вплив сил інерції, ніж сил в'язкості.

За двома критичними швидкостями ($V_{н.кр.}$, $V_{в.кр.}$) є два критичних значення числа Рейнольдса:

Нижнє критичне число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{н.кр.} d}{\nu}. \quad (3.2)$$

Верхнє критичне число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_{в.кр.} d}{\nu}. \quad (3.3)$$

За експериментами Рейнольдса нижнє критичне число $Re_{кр} = 2320$; верхнє критичне число Рейнольдса не може бути визначено точно, тому що залежить від умов входу до труби, стану внутрішньої поверхні стінки труби.

У практичних гідравлічних розрахунках користуються нижнім критичним числом Рейнольдса.

Визначивши для розглянутого руху число Рейнольдса за виразом (3.1) і порівнявши отримане значення з $Re_{кр}$, можна визначити режим руху.

Якщо $Re < Re_{кр}$, то режим руху рідини ламінарний;

Якщо $Re > Re_{кр}$, то режим руху рідини турбулентний.

Режим руху можна виявити за значеннями критичних швидкостей (нижня критична швидкість, яку далі позначатимемо просто $V_{кр}$), порівнюючи її з середньою швидкістю для розглянутого руху.

Так, з рівняння (3.2) можна записати

$$V_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{d}. \quad (3.4)$$

Тоді: якщо $V < V_{кр}$ – режим руху ламінарний;

якщо $V > V_{кр}$ – режим руху турбулентний.

При різних режимах руху мають місце різні залежності між витратами опору і середніми швидкостями руху. При ламінарному режимі витрати опору пропорційні першому ступеню швидкості, при турбулентному – швидкість знаходиться в деякому ступені $m > 1$. Якщо позначити витрату опору на прямій ділянці потоку через $h_{дл}$, то можна записати:

– при ламінарному режимі

$$h_{дл} = b \nu^{m=1}; \quad (3.5)$$

– при турбулентному режимі

$$h_{дл} = b \nu^{m=1,75 \div 2}, \quad (3.6)$$

де b – коефіцієнт пропорційності, що залежить від розмірів труби і властивостей рідини.

Вплив режиму руху рідини, а також залежність втрат опору за довжиною від швидкості руху рідини має велике значення у багатьох галузях інженерної практики (гідравліка і гідротехніка, теплотехніка і т.п.).

Склад роботи

1. Візуальне спостереження ламінарного і турбулентного режимів руху в горизонтальній трубі.

2. Визначення за експериментальними даними значень чисел Рейнольдса при ламінарному і турбулентному режимах руху і порівняння їх з критичними значеннями числа Рейнольдса для підтвердження візуального режиму руху.

3. Визначення критичної швидкості й порівняння її з середньою швидкістю за ламінарним і турбулентним режимами руху для підтвердження візуального режиму руху.

Опис експериментальної установки

Схема лабораторної установки для визначення режиму руху рідини наведена на рисунку 3.1.

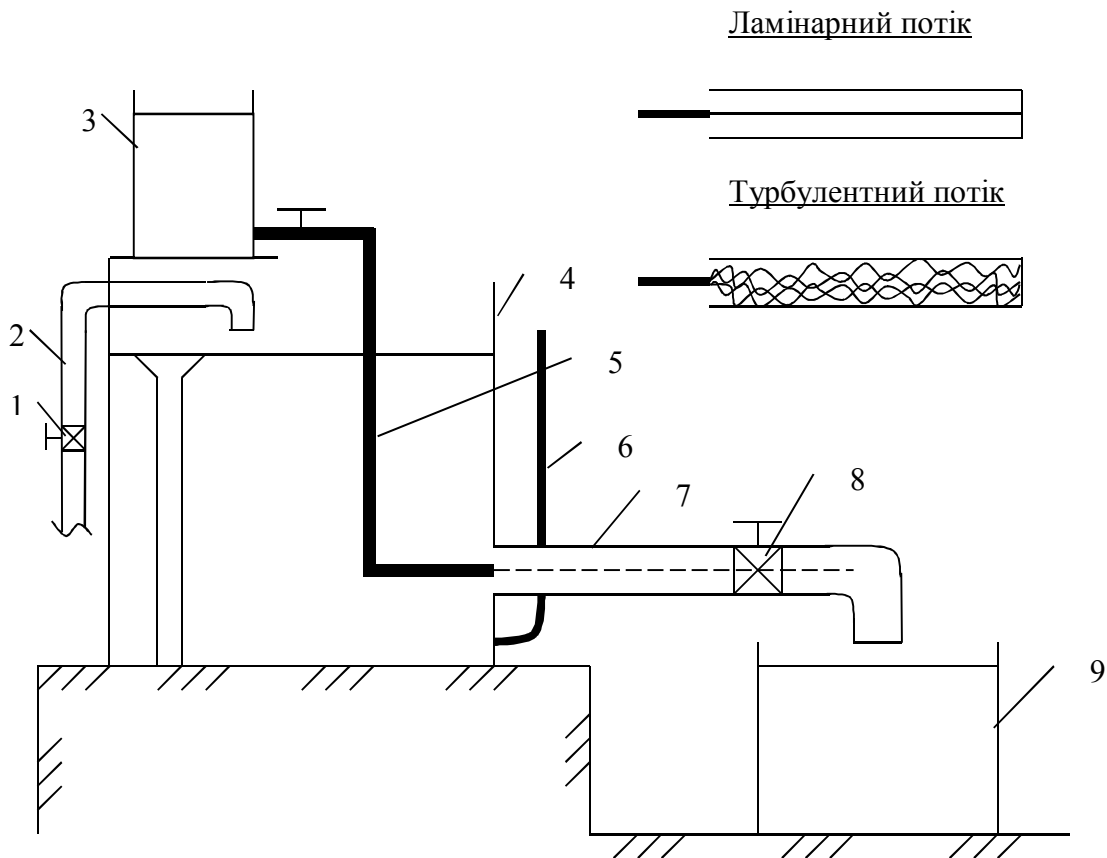


Рисунок 3.1 – Схема лабораторної установки для визначення режиму руху рідини:

*1 – кран; 2 – трубопровід; 3 – ємність з барвником; 4 – резервуар з водою;
5 – гумова трубка; 6 – п'єзометр; 7 – скляна труба; 8 – кран;
9 – приймальний резервуар*

З металевого резервуару 4 виведена скляна труба 7, швидкість руху води регулюється краном 8. Резервуар обладнаний зливним пристроєм для підтримання сталого напору. Стікає зайва вода через переливну трубу 10. Рівень води у резервуарі контролюється за допомогою п'єзометра 6. У верхній частині резервуару 4 закріплена ємність 3 з підфарбованою рідиною, витрати якої регулюється краном. Підфарбована рідина по гумовій трубці 5 вводиться до потоку води, що рухається скляною трубкою. Наповнення напірного резервуару 4 водою здійснюється по трубопроводу 2 після відкриття крану 1. Вимірювання витрати води під час експерименту проводиться об'ємним способом за допомогою мірного баку 9.

Порядок виконання роботи

1. Відкривають вентиль 1 на трубопроводі 2 і заповнюють резервуар 4 водою. При цьому рівень води в резервуарі 4 підтримується весь час постійним, тобто безперервно повинен працювати злив.

2. Відкривають кран 8. Вода починає надходити з резервуара 4 у трубку 7, внаслідок чого у скляній трубці 6 встановлюється середня швидкість руху води.

3. Краном регулюють надходження підфарбованої рідини в скляну трубку 7 так, щоб вона витікала у вигляді тонкого струмочка. Очевидно, що стрімчастий рух фарби буде свідчити про ламінарний режим руху в трубці 7.

4. Об'ємним способом визначають витрату води у трубці 7. Для цього заповнюють ємкість 9, при цьому включають секундомір. Коли вода підніметься до потрібного рівня, секундомір виключають. Таким чином фіксують об'єм ємкості 9 W і час наповнення цього об'єму T . Одночасно з виміром витрати води термометром фіксують температуру води t °C.

5. Повільно відкривають кран 8, і спостерігають за поведінкою підфарбованого струмочку до тих пір, коли струмочок почне коливатися, набуде хвилястого характеру з місцевими розривами. Опис поведінки струмочка відповідає тому станові потоку, при якому відбувається зміна ламінарного режиму на турбулентний.

6. Подальше відкриття крану 8 призводить до різкої зміни характеру руху: струмочок фарби повністю розмивається, вода у скляній трубці 7 стає рівномірно блідо підфарбованою – маємо турбулентний режим руху.

Експериментальні дані щодо визначення витрати води, її температури, діаметру труби і візуально спостережених режимів руху рідини в скляній трубці заносять в необхідні графи журналу лабораторних робіт.

Обробка експериментальних даних

1. За заміряним об'ємом води W і часом T його наповнення розраховують для кожного експерименту витрати води:

$$Q = \frac{W}{T} \quad (3.7)$$

2. За витратою води Q і площею її перетину ω визначають середню швидкість:

$$V = \frac{Q}{\omega}, \quad (3.8)$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (3.9)$$

де d – діаметр скляної трубки.

3. Знаючи температуру води t °C, знаходять кінематичний коефіцієнт в'язкості за довідником або за формулою

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2}, \text{ см}^2/\text{с}.$$

4. За формулою (3.1) для кожного експерименту обчислюють число Рейнольдса Re .

5. Порівнюють число за формулою (3.1) з критичним числом $Re_{кр} = 2320$ і уточнюють, чи відповідає режим руху, який спостерігається візуально в експерименті.

6. За формулою (3.4) встановлюють критичну швидкість, порівнюють її із середніми швидкостями для кожного експерименту і уточнюють режим руху.

Таблиця 3.1 – Журнал лабораторної роботи № 1

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик		
		1–й експеримент	2–й експеримент	3–й експеримент
1	2	3	4	5
1	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час W , л			
2	Тривалість витікання T , с			
3	Температура води t °C			
4	Діаметр труби d , мм			
5	Вхід до труби – плавний, неплавний			
6	Візуально спостережуваний режим руху			
7	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /с			
8	Площа перерізу труби $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, см ²			
9	Середня швидкість $V = \frac{Q}{\omega}$, см/с			
10	Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = f(t \text{ } ^\circ\text{C})$, см ² /с			
11	Число Рейнольдса за експериментом $Re = \frac{Vd}{\nu}$			
12	Співвідношення між Re і $Re_{кр}$			
13	Критична швидкість $V_{кр} = \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{d}$, см/с			
14	Співвідношення між V і $V_{кр}$			

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5
15	Режим руху, що відповідає отриманим співвідношенням: Re і $Re_{кр}$, V і $V_{кр}$			

« _____ » _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. Що називають ламінарним і турбулентним режимом руху?
2. Від яких факторів залежить режим руху рідини?
3. Напишіть аналогічний вираз числа Рейнольдса для різних лінійних характеристик русла.
4. Який фізичний зміст числа Рейнольдса?
5. Що таке критичне число Рейнольдса і яке його значення для трубопроводів?
6. Як визначити режим руху?
7. Що таке критична швидкість?
8. Як залежать втрати напору за довжиною по відношенню до швидкості при ламінарному і турбулентному режимі?
9. Навіщо треба знати режим руху?

Лабораторна робота № 2

Визначення коефіцієнта гідравлічного тертя при русі у напірному трубопроводі

Загальні відомості

Вирішення багатьох задач гідравліки зводиться до знаходження залежності зміни швидкості потоку за довжиною. Для цього використовують два рівняння гідродинаміки:

1) рівняння нерозривності потоку

$$U_1 \omega_1 = U_2 \omega_2 = \dots = U_n \omega_n = \text{const} = Q; \quad (3.10)$$

2) рівняння Д. Бернуллі

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_{w1-2}. \quad (3.11)$$

Але ці два рівняння мають три невідомих: швидкість, тиск і втрати опору, тому для їх вирішення необхідно мати третє рівняння, за яким знаходять невідомі величини. Таким рівнянням є залежність витрат опору від середньої швидкості.

Відомо, що кількісне визначення витрат енергії і вивчення методів їх розрахунків являє собою одне з головних завдань гідравліки. Як свідчать експерименти, в багатьох випадках втрати опору пропорційні квадрату середньої швидкості руху рідини, тому в гідравліці прийнято виражати витрати енергії пропорційно швидкісному напору:

$$\Sigma h_m = \Sigma \xi \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (3.12)$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору.

Такий запис втрати опору зручний тим, що містить у собі швидкісний напір за рівнянням Д. Бернуллі. Коефіцієнт опору ξ , таким чином, є співвідношенням втраченого напору до швидкісного.

Існує дві різновидності втрати енергії: втрати енергії за довжиною і місцеві втрати. Отже загальний вираз втрати опору за рівнянням Д. Бернуллі такий:

$$h_w = \Sigma h_l + \Sigma h_m. \quad (3.13)$$

Втрати енергії за довжиною обумовлюють гідравлічним опором за довжиною потоку внаслідок роботи сил тертя. Втрати енергії за довжиною розподіляються рівномірно на ділянках прямолінійного і рівномірного руху і в незначній мірі нерівномірно на ділянках нерівномірного руху. Ці втрати енергії в чистому вигляді виникають на прямих трубах постійного перетину, тобто при рівномірному русі рідини, зростають пропорційно довжині труби.

У загальному вираженні втрати опору за довжиною можна отримати з рівняння Д. Бернуллі:

$$h_l = \left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} \right). \quad (3.14)$$

Для горизонтальної труби постійного перетину вираз (3.14) матиме вигляд

$$h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}. \quad (3.15)$$

Втрати за довжиною можна визначити за загальною формулою (3.15), тобто:

$$h_l = \zeta_l \frac{V^2}{2g}, \quad (3.16)$$

де ζ_l – коефіцієнт витрати руху рідини за довжиною труби, що має вигляд

$$\zeta_l = \lambda \frac{l}{d}. \quad (3.17)$$

У результаті маємо формулу Вейсбаха – Дарсі для визначення втрати опору за довжиною, коли рідина рухається трубою:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (3.18)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;
 l – довжина ділянки труби;
 d – діаметр труби;
 V – середня швидкість;
 g – прискорення сили тяжіння.

Формула Вейсбаха–Дарсі дійсна як для ламінарного, так і турбулентного режиму руху. Різними будуть формули розрахунку коефіцієнта гідравлічного тертя λ , від вибору величини якого залежить точність гідравлічних розрахунків.

Коефіцієнт гідравлічного тертя λ є одним з найважливіших коефіцієнтів при визначенні втрат опору. Тому вивчення фізичних факторів, що впливають на його величину, визначення методів його обчислення було предметом широких теоретичних та експериментальних досліджень багатьох інженерів і вчених.

У разі рівномірного руху рідини в трубі прирівнюють праві частини рівняння (3.18) і рівняння рівномірного руху:

$$h_l = \frac{\tau_0 l}{\rho g R}, \quad (3.19)$$

де τ_0 – дотичне напруження на стінці труби.

$$\lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} = \frac{\tau_0 l}{\rho g R}. \quad (3.20)$$

Відомо, що для круглої труби $d = 2R$, тоді одержимо

$$\lambda = \frac{4\tau_0}{\rho V^2}. \quad (3.21)$$

Таким чином коефіцієнт гідравлічного тертя є величина, пропорційна відношенню напруження тертя на стінці труби до динамічного тиску, обчисленого за середньою швидкістю потоку.

Сучасні формули для обчислення коефіцієнта λ передбачають його залежність від двох безрозмірних параметрів: відносної еквівалентної шорсткості стінок і числа Рейнольдса.

Для вивчення чинників, що впливають на величину коефіцієнта λ , і теоретичних розробок проблеми руху рідини в трубах велике значення мають роботи Прандля, Кармана, Нікурадзе та ін.

Склад роботи

1. Експериментальне визначення коефіцієнта гідравлічного тертя λ для напірного трубопроводу постійного перерізу.
2. Порівняння отриманих значень λ з обчисленими за емпіричними формулами, наведеними вище.

Опис експериментальної установки

Робота з визначення коефіцієнта гідравлічного тертя на трубі постійного перерізу (рис. 3.2), встановленій горизонтально.

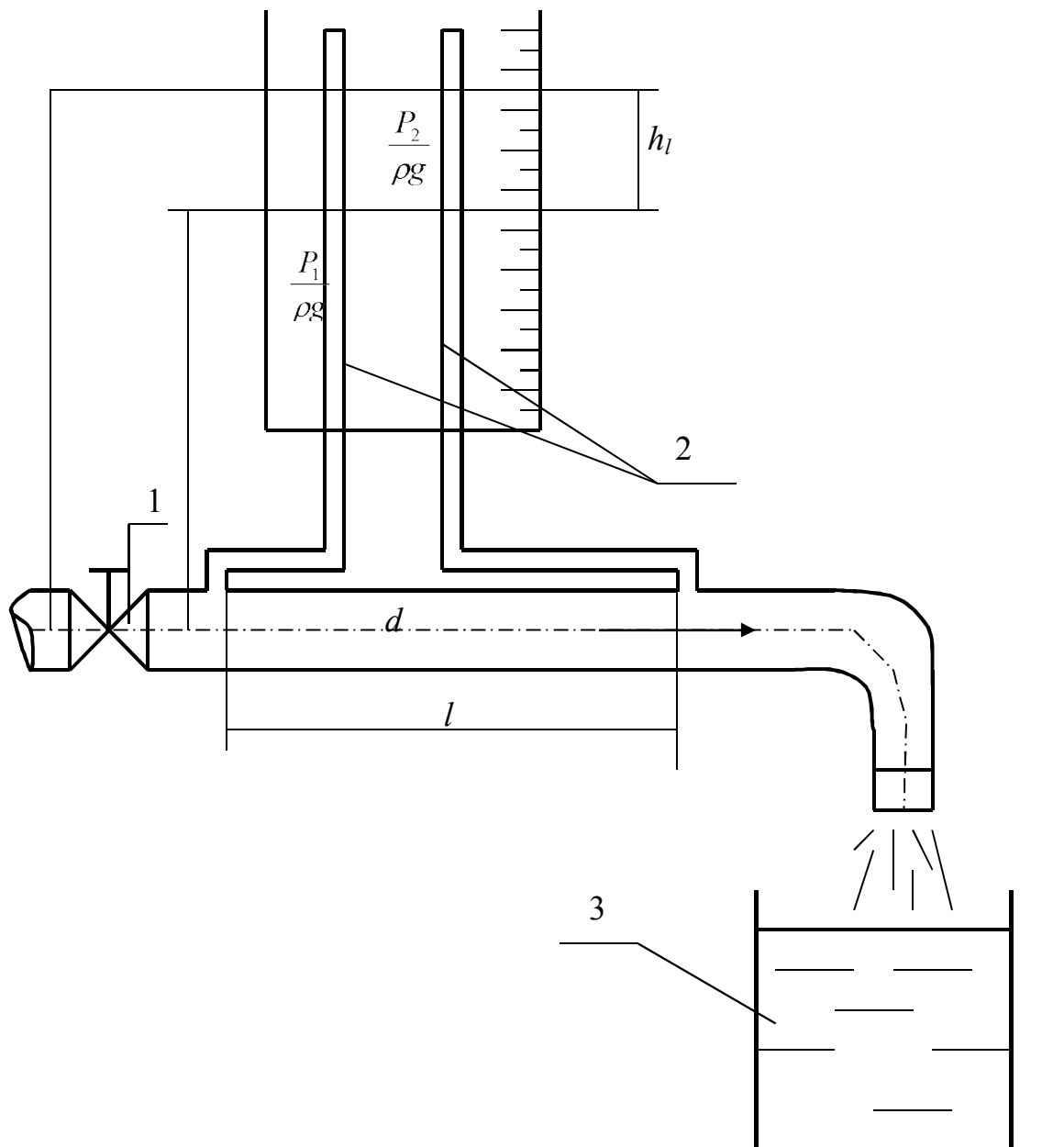


Рисунок 3.2 – Схема експериментальної установки для лабораторної роботи № 2:

1 – вентиль; 2 – п'єзометри; 3 – мірний резервуар

На трубопроводі є два п'єзометри, встановлені на відстані l . Для регулювання витрати води по трубопроводу на його початку встановлено вентиль 1. Вимірювання витрати води під час експериментів проводимо об'ємним способом за допомогою мірного резервуара 3.

Порядок виконання роботи

1. Вимірюють діаметр трубопроводу і його довжину (відстань між п'єзометрами).
 2. За допомогою вентилля 1 у трубопроводі встановлюють деяку постійну витрату води.
 3. Використовуючи мірний резервуар, вимірюють об'єм води W , який надходить у резервуар 3 за час T .
 4. Вимірюють температуру води t °C за допомогою термометра.
 5. Записують показання обох п'єзометрів, які встановлені на трубопроводі. Якщо рівень води у п'єзометрах коливається, необхідно фіксувати середній рівень води.
 6. При проведенні наступних експериментів за допомогою вентилля 1 змінюють витрату (у більший або менший бік) і виконують ті ж вимірювання.
- Результати вимірювань записуємо у відповідні граfi журналу лабораторних робіт.

Обробка експериментальних даних.

1. За об'ємом води W і часом T визначаємо витрату:

$$Q = \frac{W}{T}.$$

2. За виміряним діаметром труби d знаходимо площу живого перерізу:

$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

3. За витратою Q і площиною живого перерізу ω визначаємо середню швидкість руху води:

$$V = \frac{Q}{\omega}.$$

4. Визначаємо кінематичний коефіцієнт в'язкості ν за температурою води.

5. Маючи значення швидкості та кінематичного коефіцієнта в'язкості ν , обчислюємо Re :

$$Re = \frac{Vd}{\nu}.$$

6. За різницею показів п'єзометрів визначаємо витрати опору за довжиною трубопроводу за формулою (3.15.)

7. Використовуючи формулу Вейсбаха – Дарсі (3.16), обчислюємо експериментальні значення коефіцієнта гідравлічного тертя:

$$\lambda_{\text{екс}} = \frac{2gdh_l}{lV^2}$$

8. Залежно від значення числа Рейнольдса визначають коефіцієнт гідравлічного тертя λ за однією або декількома емпіричним формулами, які наведені в розділі «Загальні відомості», і порівнюють коефіцієнти гідравлічного тертя $\lambda_{\text{екс}}$ та $\lambda_{\text{теор}}$.

Всі результати обчислень записують до журналу.

Таблиця 3.2 – Журнал лабораторної роботи № 2

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик					
		1–й експеримент		2–й експеримент		3–й експеримент	
1	2	3		4		5	
1	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час, л						
2	Тривалість витікання T, с						
3	Температура води t °C						
4	Діаметр труби d, мм						
5	Довжина труби l, см						
6	Номер перерізу	1	2	1	2	1	2
7	Показання п'єзометрів $\frac{P}{\rho g}$, см						
8	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /с						
9	Площа перерізу труби $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, см ²						
10	Середня швидкість $V = \frac{Q}{\omega}$, см/с						
11	Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = f(t \text{ } ^\circ\text{C})$, см ² /с						
12	Число Рейнольдса за експериментом $Re = \frac{Vd}{\nu}$						
13	Втрати напору за довжиною $h_l = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$, см						
14	Коефіцієнт гідравлічного тертя за експериментом $\lambda_{\text{екс}} = \frac{2gdh_l}{lV^2}$						

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5
15	Коефіцієнт гідравлічного тертя за емпіричними формулами: 1. 2. 3.			
16	Висновки:			

«_____» _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. Які ви знаєте втрати напору та методи їх визначення?
2. Поясніть причину виникнення втрат напору?
3. Як прийнято визначати втрату напору методом обчислення?
4. Напишіть формули для визначення місцевих втрат напору і втрат напору за довжиною.
5. Що таке гідравлічно гладкі й гідравлічно шорсткі труби? Чому це поняття умовне?
6. Які фактори впливають на коефіцієнт гідравлічного тертя при ламінарному і турбулентному русі у гідравлічно гладких трубах, у перехідній зоні опору та гідравлічно шорстких трубах?
7. Який фізичний зміст коефіцієнта гідравлічного тертя?
8. За якими факторами можна визначити коефіцієнт гідравлічного тертя?

Лабораторна робота № 3 **Визначення коефіцієнтів місцевих опорів при напірному русі рідини**

Загальні відомості

Місцеві втрати енергії обумовлюються місцевими гідравлічними опорами, тобто опорами, що виникають у місцях з різкою зміною величини і напрямку швидкості, на ділянках з різкою зміною конфігурації потоку. Як правило, в цих місцях виникають вихроутворення.

Отже місцеві втрати енергії виникають тільки в окремих місцях потоку і мають місцевий характер. На таких ділянках робота сил тертя значно більше, ніж на прямолінійних ділянках з рівномірним рухом.

До місцевих опорів на трубах відносять різні фасонні частини й арматуру (розширення, звуження, вентилі, повороти /коліна/ (рис. 3.3), засувки, крани), необхідність встановлення яких викликана умовами споруди і експлуатації трубопроводів.

Місцеві опори викликають зміни швидкості руху рідини або за значенням (розширення і звуження), або за напрямком (коліна). У всіх випадках має місце перерозподіл швидкостей.

На подолання місцевих опорів витрачається частина енергії потоку, яку називають місцевою втратою опору. У практичних розрахунках її прийнято виражати в частках питомої кінетичної енергії (швидкісного напору):

$$h_l = \xi \frac{V^2}{2g}. \quad (3.22)$$

Це формула Ю. Вейсбаха, де ξ – коефіцієнт місцевого опору. Величина його залежить від виду місцевого опору, числа Рейнольдса і в деякій мірі від шорсткості стінки, а для різних запірних пристроїв (засувки, крани) – від ступеня їх відкриття.

Зважаючи на велику складність явищ, що відбуваються в рідині, яка протікає через місцевий опір, тільки в деяких випадках ξ_m знайти можна теоретично (раптове розширення або звуження трубопроводу). У більшості випадків ξ_m визначають експериментальним шляхом і виражають емпіричними формулами, графіками і таблицями. Значення цих коефіцієнтів для різних місцевих опорів наводяться у довідниках з гідравліки. Довідники подають коефіцієнти місцевих опорів для турбулентного режиму руху з великими числами Рейнольдса, де в'язкість рідини себе не виявляє, але при ламінарному або близькому до нього рухові коефіцієнт місцевих опорів залежить від числа Рейнольдса.

При малих значеннях ефект опору, викликаний діями сил в'язкості і пропорційний швидкості в першому ступені. Коефіцієнт опору в цьому випадку зворотно пропорційний числу Рейнольдса:

$$\xi_m = \frac{A}{Re}, \quad (3.23)$$

де A – стала, що залежить від виду місцевого опору й ступеня стиснення потоку (довідники з гідравліки).

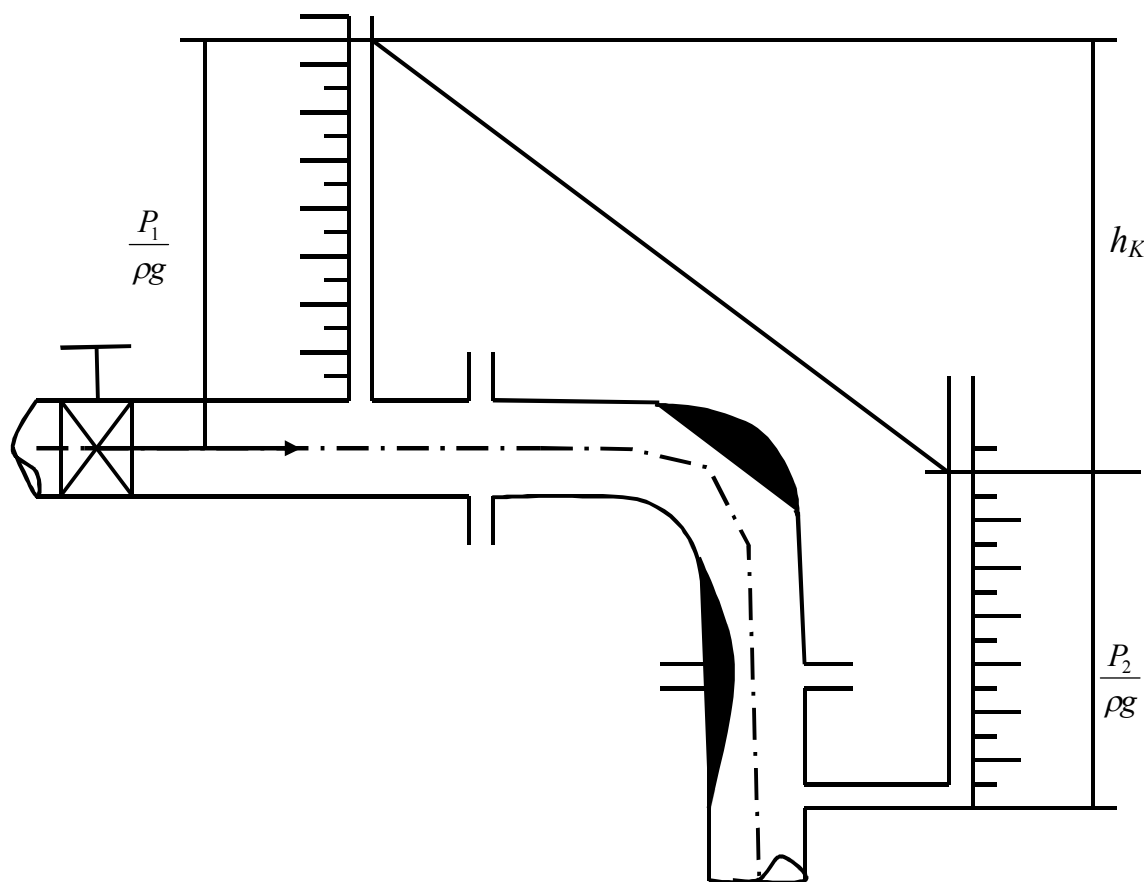


Рисунок 3.3 – Експериментальна установка для визначення місцевих опорів у коліні

Ця залежність була отримана теоретично, коли виводили формулу коефіцієнта гідравлічного тертя для ламінарного режиму в круглій циліндричній трубі.

Але експериментальні дослідження показали, що зі зростанням числа Рейнольдса, яке ще відповідає ламінарному режимові, значення ξ_m зростають. Це явище пояснюється виникненням вихроутворень в місцевих опорах.

При великих числах Рейнольдса формуються відривні течії, які і є причиною місцевих опорів при великих числах Рейнольдса. Це зона квадратичного опору, де $\xi_m = \text{const}$ для конкретного місцевого опору. У першому наближенні можна сказати, що при різних переходах в місцевих опорах ξ_m не залежить від значень Re , якщо $Re \geq 3000$, але при плавних переходах $Re > 1000$.

Коефіцієнт опору при невеликих числах Рейнольдса можна приблизно визначити за формулою А.Д. Альдшуля:

$$\xi_m = \frac{A}{Re} + \xi_{m.кв.}, \quad (3.24)$$

де $\xi_{м.кв.}$ – коефіцієнт місцевого опору для квадратичної зони.

Склад роботи

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів місцевих опорів: поворот труби на кут 90° .
2. Порівняння отриманих експериментальних значень ξ_m з довідковими.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 3.4) складається з трубопроводу, який підводить воду до установки, регулюючого крана і повороту. Краном установлюють рівень води в п'єзометрах на висоті, зручній для відліку. Для регулювання витрати води на трубопроводі встановлено вентиль. Для визначення витрати води під час проведення експерименту є мірний резервуар.

Порядок проведення роботи

1. До початку виконання лабораторної роботи приводять установку в робоче положення. При цьому вентиль 2 повинен бути закритий, а другий вентиль бвідкритий.
2. Відкриттям вентиля 2 виганяють повітря з трубопроводу та п'єзометрів і встановлюють потрібну витрату води.
3. Після того, як рух у трубі буде сталим, що підтвердиться сталим рівнем води в п'єзометрах, визначають об'ємним способом витрату води. Для цього секундоміром визначають час T , заповнення об'єму W .
4. Необхідно провести не менше трьох експериментів, які відрізняються один від одного витратою води.

Обробка експериментальних даних

1. За об'ємом води W і часом T визначаємо витрату:

$$Q = \frac{W}{T}.$$

2. За витратою Q і площиною живого перерізу ω знаходимо середню швидкість руху води

$$V = \frac{Q}{\omega},$$
$$\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

3. Визначаємо питому кінетичну енергію (швидкісний напір) в перерізі:

$$h_v = \frac{\alpha V^2}{2g}.$$

4. За встановленими значеннями питомої потенціальної енергії (показання п'єзометрів) і питомої кінетичної енергії (швидкісний напір $\frac{\alpha V^2}{2g}$) знаходимо повну енергію в перерізах перед місцевими опорами і після них:

$$E = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{\alpha V^2}{2g}. \quad (3.25)$$

5. За різницею значень повних питомих енергій знаходимо втрати напору місцевих опорів:

$$h_M = E_1 - E_2. \quad (3.26)$$

Коли діаметр трубопроводу до опору й за ним однаковий, втрати напору визначаємо так:

$$h_M = (Z_1 + \frac{P_1}{\rho g}) - (Z_2 + \frac{P_2}{\rho g}). \quad (3.27)$$

6. За формулою (3.22) обчислюємо експериментальні значення коефіцієнтів місцевих опорів:

$$\xi_M = \frac{2gh_M}{V^2}. \quad (3.28)$$

7. Отримані дані коефіцієнтів місцевих опорів порівнюємо з довідковими даними.

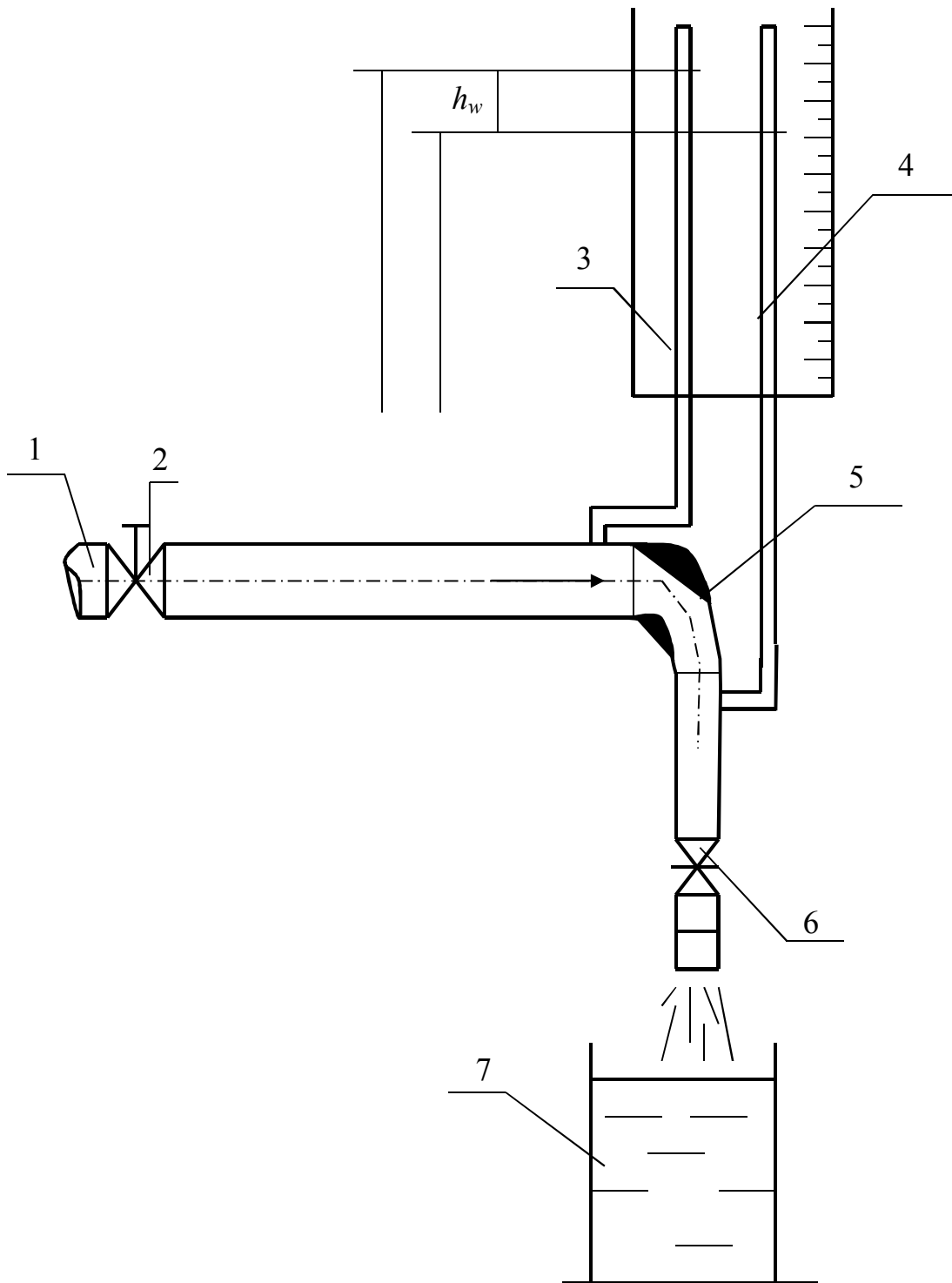


Рисунок 3.4 – Схема установки для експериментального визначення коефіцієнтів місцевого опору:
1 – трубопровід; 2 – вентиль; 3, 4 – п'єзометри; 5 – коліно (поворот); 6 – вентиль; 7 – приймальний резервуар

Таблиця 3.3 – Журнал лабораторної роботи № 3

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик					
		1-й експеримент		2-й експеримент		3-й експеримент	
1	2	3		4		5	
1	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час, л						
2	Тривалість витікання Т, с						
3	Діаметр труби: – до опору d_1 , мм – за опором d_2 , мм						
4	Номери перерізу (п'єзометрів)	1	2	1	2	1	2
5	Питома потенціальна енергія (показання п'єзометрів), см						
6	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /с						
7	Площа живих перерізів трубопроводу $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$; $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$, см ²						
8	Середня швидкість $V_1 = \frac{Q}{\omega_1}$; $V_2 = \frac{Q}{\omega_2}$, см/с						
9	Питома кінетична енергія (швидкісний напір) у перерізах $\frac{\alpha V_1^2}{2g}$; $\frac{\alpha V_2^2}{2g}$, см						
10	Повна питома енергія в перерізах $E_1 = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g}$; $E_2 = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g}$, см						
11	Величина місцевих втрат напору $h_M = E_1 - E_2$, см						
12	Коефіцієнт місцевого напору за результатами експерименту $\xi_M = \frac{2gh_M}{V^2}$						

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5
13	Коефіцієнт місцевого опору за емпіричними формулами і за довідниками			
14	Висновки:			

« _____ » _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. Які опори є місцевими?
2. Які причини виникнення місцевих втрат напору, за якою формулою можна знайти їх значення?
3. Від чого залежить коефіцієнт місцевих опорів, як вони визначаються ?
4. Для яких місцевих опорів коефіцієнт може визначатися теоретично?
5. Як визначити місцеві втрати напору, якщо середні швидкості до опору і за ним різні за значенням?
6. Як визначити втрати напору при раптовому розширенні труби?

Лабораторна робота № 4
***Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості й опору при витіканні
рідини через отвір при сталому напорі***

Загальні відомості

У гідротехніці та інших областях народного господарства часто вирішують питання, пов'язані з витіканням рідини з отворів.

Витікання рідини може відбуватися в атмосферу (не підтоплені отвори), або під рівень води (затоплені отвори) при сталому або змінному напорі.

У різних областях техніки зустрічаються завдання, при яких рідина витікає через різні за формою і розмірами отворів.

Зважаючи на велике практичне значення, витіканням рідини через отвір займалися великі вчені: широко відомі експерименти учнів Галілея–Кастеллі й Торічеллі (1643 р.), які вивчали швидкість витікання рідини через отвір. Д. Бернуллі вирішував задачі про встановлення швидкості витікання рідини через отвір, вивів своє рівняння.

З того часу інженери й науковці виконали багато робіт щодо витікання рідини через отвір. Складність картини витікання через отвір пояснюється тим, що ще немає теорії витікання з отвору, а в розрахункові формули витікання рідини вводять експериментальні коефіцієнти.

При витіканні струменя з отвору на відстані від внутрішньої стінки резервуара, яка дорівнює приблизно $0,5 d$ (де d – діаметр створу), утворюється “стислий переріз” (рис. 3.5). Площа стислого перерізу струменя ω_c менше площі отвору ω . Стискання струменя характеризується коефіцієнтом стискання E , є відношення площі стислого перерізу ω_c до площі отвору ω .

$$E = \frac{\omega_c}{\omega} . \quad (3.29)$$

При витіканні струменя в атмосферу з малого отвору в тонкій стінці відбувається зміна форми струменя за довжиною (особливо це спостерігається при витіканні з квадратних, прямокутних і трикутних отворів). Таке явище називають інверсією струменя (рис. 3.6). Це явище виникає під дією сил поверхневого натягу на струмінь, що витікає.

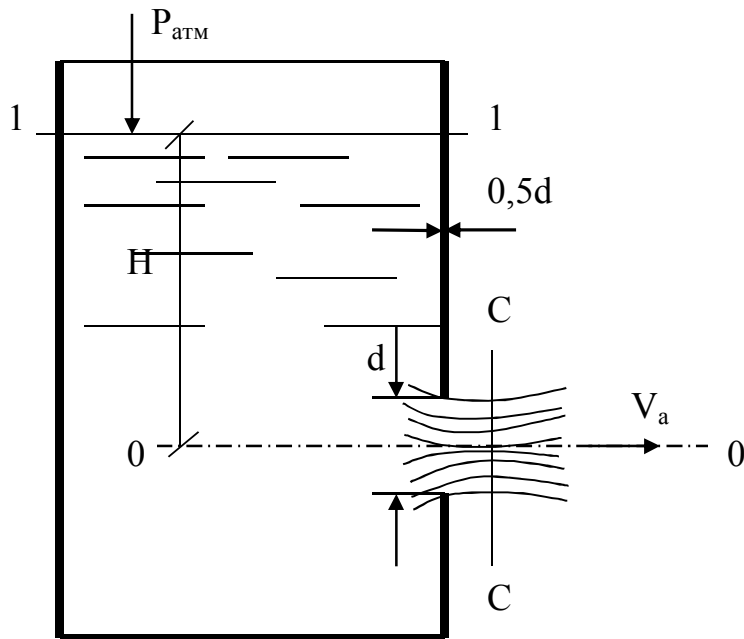


Рисунок 4.1 – Схема витікання струменя через тонку стінку

Якщо використати рівняння Бернуллі й написати його для двох перерізів, один з яких (1–1) співпадає з вільною поверхнею рідини в резервуарі, а другий (C–C) – зі стислим перерізом, за площину порівняння вибираємо площину (0–0), що проходить через центр ваги отвору (рис. 3.5), то при витіканні в атмосферу через малий отвір у тонкій стінці отримуємо розрахункові формули:

$$V = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (3.30)$$

$$\text{та } Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (3.31)$$

де V – середня швидкість у сталому перерізі струменя;

g – прискорення сили ваги;

H – напір над центром ваги отвору;

Q – витрата;

ω – площа отвору;

μ – коефіцієнт витрати, що дорівнює добутку коефіцієнта стискання і коефіцієнта швидкості:

$$\mu = \varepsilon \cdot \varphi, \quad (3.32)$$

φ – коефіцієнт швидкості, що визначається за формулою

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}}, \quad (3.33)$$

ξ – коефіцієнт опору.

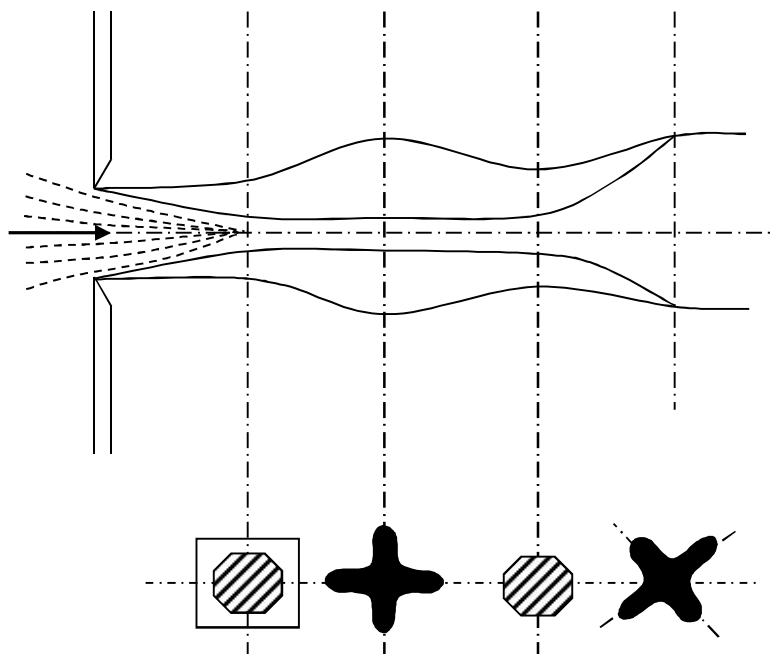


Рисунок 3.6 – Схема зміни форми поперечного перерізу струменя за довжиною

Фізичний зміст коефіцієнта витрати та його числове значення можуть бути знайдені за формулою

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}, \quad (3.34)$$

або коефіцієнт витрати можна визначити як співвідношення дійсної витрати до теоретичної.

Аналогічно може бути встановлений фізичний зміст коефіцієнта швидкості:

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gH}}, \quad (3.35)$$

де φ – характеризує зменшення дійсної швидкості V витікання в'язкої рідини у порівнянні з теоретичною $V_{теор}$ не в'язкої рідини, яка визначається за формулою Торічеллі:

$$V_{теор} = \sqrt{2gH}. \quad (3.36)$$

Числове значення коефіцієнта швидкості можна визначити, враховуючи, що при витіканні рідини з отвору струмінь набуває форму параболи. Виходячи із закону вільного падіння, будемо мати:

$$x = V \cdot t, \quad (3.37)$$

$$y = \frac{gt^2}{2}, \quad (3.38)$$

де x і y – координати довільної точки струменя відносно початку координат, який співпадає з центром ваги стислого перерізу (рис. 3.5);

t – час руху частини рідини від стислого перерізу до потрібного перерізу.

Виключаючи з рівнянь (3.37) і (3.38) час t , отримаємо:

$$V = \frac{x\sqrt{g}}{\sqrt{2y}}. \quad (3.39)$$

Підставляючи значення V з рівняння (3.39) у рівняння (3.35), маємо:

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{Hy}}. \quad (3.40)$$

Визначивши таким чином φ , можна з рівняння (3.33) знайти коефіцієнт опору ξ :

$$\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1. \quad (3.41)$$

На основі багатьох експериментів для круглих, квадратних отворів у тонкій стінці при абсолютному стисканні й при числах Рейнольдса $> 10^5$ коефіцієнти витікання мають такі значення:

$$E = 0,63 \div 0,64; \xi = 0,06; \varphi = 0,97; \mu = 0,62.$$

При $Re < 10^5$ зростає нерівномірність розподілу швидкостей у початковому перерізі струменя і збільшуються втрати напору. Збільшення коефіцієнта кінетичної енергії α і коефіцієнта опору ξ призводить до зменшення коефіцієнта швидкості φ .

Експерименти підтвердили, що при $Re > 10^5$ значення Re на коефіцієнт витікання не впливають (квадратична зона опору).

Склад роботи

1. Визначити експериментальним шляхом коефіцієнти витрати, швидкості, стискання та опору при витіканні з отвору в тонкій стінці й порівняти ці коефіцієнти з довідковими.

2. Спостереження явища інверсії струменя, що витікає з отворів різної форми.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 3.7) складається з напірного резервуара 6. Надходження води в напірний резервуар регулюється за допомогою вентиля 3. Для підтримки сталого напору резервуар обладнаний переливним пристроєм. До напірного резервуара приєднаний патрубок, на який встановлюють отвори 7 різної форми й типів. Вода з отвору 7 витікає у вимірний резервуар 6.

Для вимірювання координат осі струменя, що витікає з отвору, застосовують спеціальний пристрій (координатник), що складається з горизонтальної рейки зі шкалою 4 і мірною голкою 5, яка вільно пересувається по горизонтальній рейці. Нуль шкали горизонтальної рейки співпадає зі стислим перерізом струменя.

Напір, при якому відбувається витікання, фіксується п'єзометром 8.

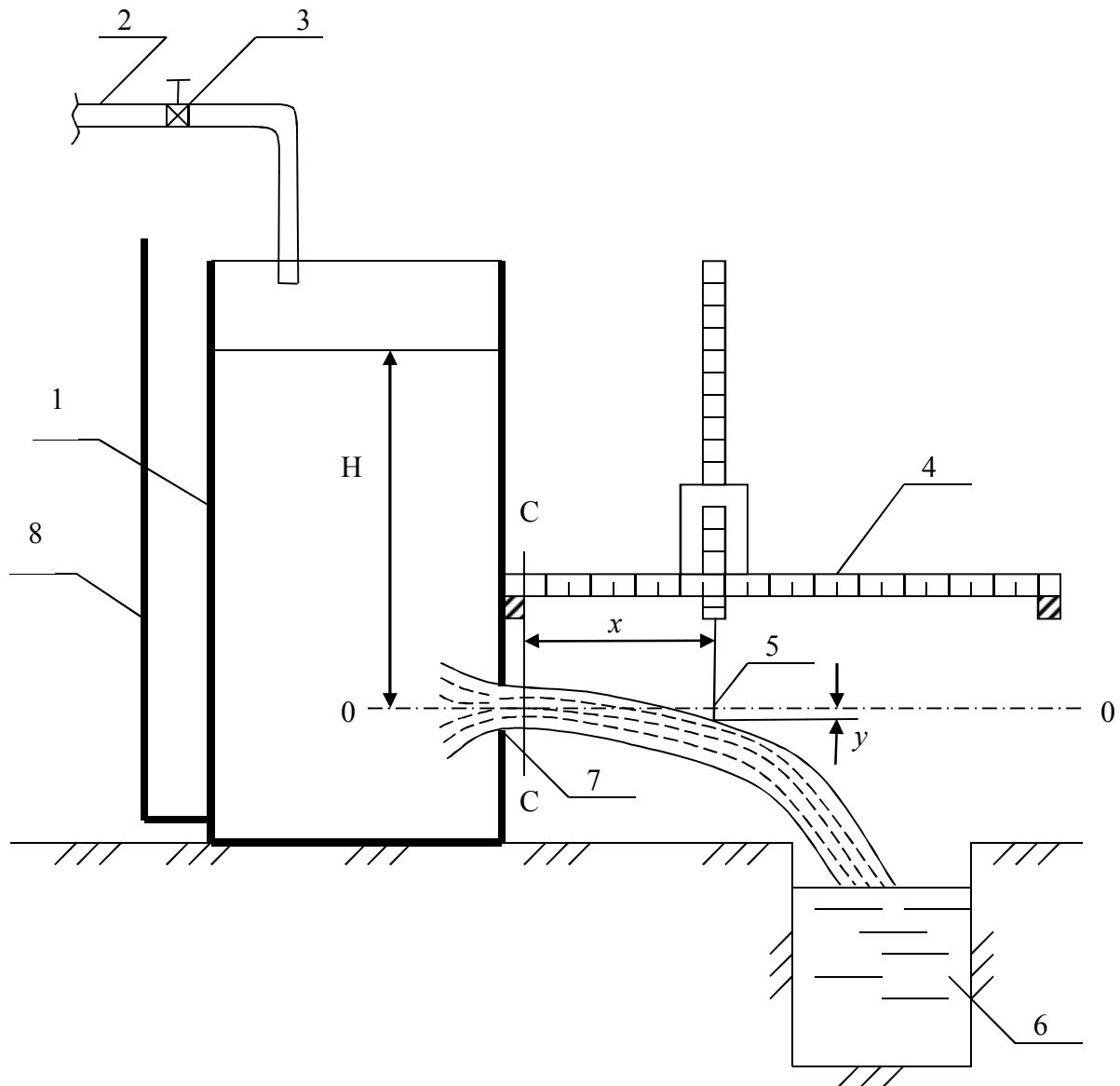


Рисунок 3.7 – Схема експериментальної установки для лабораторної роботи № 4:

1 – резервуар; 2 – трубопровід подачі води; 3 – вентиль;
4 – горизонтальна рейка зі шкалою; 5 – мірна голка;
6 – вимірний резервуар; 7 – отвір; 8 – п'єзометр.

Порядок проведення роботи

1. Вимірюємо діаметр d , а для некруглих отворів – розміри поперечного перерізу і приєднуємо отвір до торцевої стінки патрубку.
2. Відкриваємо кран 3 на трубі 2 і наповнюємо водою напірний резервуар 1. На весь час проведення експерименту перелив повинен працювати, тобто напір H має бути сталим і фіксуватися п'єзометром 8.
3. Визначаємо об'єм води W , за часом T , що фіксується секундоміром.

4. За допомогою штангенциркуля або спеціального пристрою вимірюємо розміри поперечного перерізу струменя в стислому перерізі по горизонталі b й по вертикалі a .

5. За допомогою координатника 4 і вимірної голки 9 знаходимо координати x і y , якої-небудь точки осі струменя, що витікає з отвору.

6. Змінюючи по чергові отвори, спостерігаємо явище інверсії струменя при витіканні з отвору різної форми.

Обробка експериментальних даних

1. Визначення площини перерізу отвору:

а) круглого $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$; (3.42)

б) не круглого $\omega = a \cdot b$, (3.43)

де b – ширина прямокутного отвору;

a – висота прямокутного отвору;

2. За виконаними замірами обчислюємо площу струменя в стислому перерізі за формулою

$$\omega_c = \frac{\pi ab}{4}. \quad (3.44)$$

3. Знаходимо коефіцієнт стискання струмини за формулою (3.29)

$$E = \frac{\omega_c}{\omega}.$$

4. За отриманими замірами обчислюємо витрату

$$Q = \frac{W}{T}.$$

5. За формулою (3.31) обчислюємо коефіцієнт витрати отвору μ :

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}.$$

6. Визначаємо коефіцієнт швидкості рідини з отвору із співвідношенням (3.33) як

$$\varphi = \frac{\mu}{E}, \quad (3.45)$$

і за рівнянням (3.40), співставляємо їх.

7. Обчислюємо коефіцієнт опору отвору ξ за формулою (3.41):

$$\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1.$$

8. За рівнянням (3.30) знаходимо дійсну середню швидкість у стиснутому перерізі, а за рівнянням (3.36) – швидкість без урахування опору – теоретичну швидкість у цьому ж перерізі.

9. За співвідношенням швидкостей за формулою (3.35) знову обчислюємо коефіцієнт швидкості φ і співставляємо його значення з коефіцієнтом швидкості, який знаходимо за формулами (3.35) та (3.40).

10. Обчислюємо експериментальним шляхом коефіцієнти μ , φ , E та ξ і співставляємо їх з довідковими.

Таблиця 3.4 – Журнал лабораторної роботи № 4

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик
1	2	3
1	Діаметр круглого отвору d , мм	
2	Площа перерізу круглого отвору $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, см ²	
3	Розміри прямокутного (квадратного) отвору: – висота отвору a , мм – ширина отвору b , мм	
4	Площа перерізу прямокутного (квадратного) отвору $\omega = a \cdot b$, см ²	
5	Напір, під яким відбувається витікання H_0 , м	
6	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час W , л	
7	Тривалість витікання T , с	
8	Розміри струменя у стислому перерізі при витіканні з отвору: - по вертикалі a , мм - по горизонталі b , мм	
9	Площа струменя в стислому перерізі отвору $\omega_c = \frac{\pi ab}{4}$, см ²	
10	Коефіцієнт стискання струменя, що витікає з отвору $E = \frac{\omega_c}{\omega}$	
11	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /с	
12	Коефіцієнт витрати з отвору $\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$	
13	Координати точки на осі струменя, що витікає з отвору: - абсциса – x , см - ордината – y , см	

Продовження таблиці 3.4

1	2	3
14	Коефіцієнт швидкості отвору: - з співвідношення $\varphi = \frac{\mu}{E}$ - з рівняння $\varphi = \frac{x}{2\sqrt{Hy}}$	
15	Швидкість у стислому перерізі отвору з урахуванням опору $V = \varphi\sqrt{2gH}$, см/с	
16	Швидкість у стислому перерізі отвору без урахування опору (теоретична) $V_{теор} = \sqrt{2gH}$, см/с	
17	Коефіцієнт швидкості отвору за співвідношенням швидкостей $\varphi = \frac{V}{V_{теор}}$	
18	Коефіцієнт опору $\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1$	
19	Висновки:	

«_____» _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. Який гідравлічний зміст має назва “тонка стінка”?
2. Який отвір називають малим?
3. В яких умовах отвір буде знаходитися в умовах неповного стискання, не зовсім стиснутого, зовсім стиснутого?
4. Які числові значення мають коефіцієнти μ , φ , E і ξ при витіканні з отвору в тонкій стінці?
5. Який фізичний зміст коефіцієнтів μ і φ ?
6. Що таке коефіцієнт стискання струменя?
7. Який зв’язок існує між коефіцієнтом швидкості й коефіцієнтом опору?
8. Як визначається коефіцієнт витрати через коефіцієнти E та φ ?
9. Напишіть формулу пропускну здатності отвору.

Лабораторна робота № 5
Визначення коефіцієнта витрати, швидкості, стискання й опору при
витіканні рідини через насадок при сталому напорі

Загальні відомості

Насадком називається коротка труба довжиною від 3 до $8d$ (d – внутрішній діаметр насадки). Насадки діляться на три типи: циліндричні, конічні й коноїдальні (рис. 3.8).

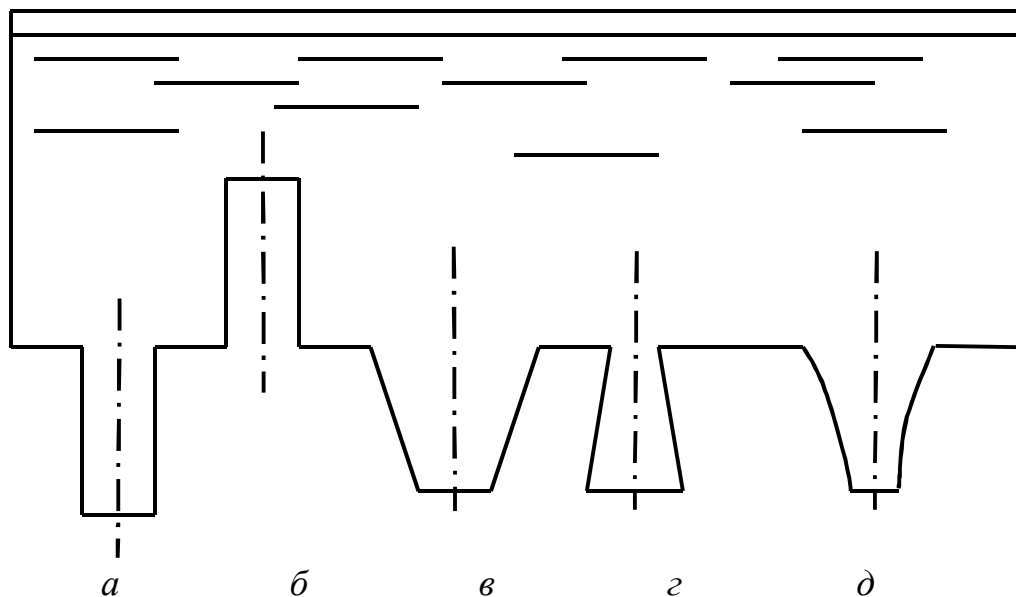


Рисунок 3.8 – Типи насадків

В інженерній практиці зустрічаються різноманітні типи насадків: зовнішня циліндрична насадка, або Вентурі (рис. 3.8, а), яка являє собою пряму циліндричну трубку довжиною $(3,5 - 7)d$, приставлену із зовнішнього боку стінки без закруглення вхідної кромки.

Внутрішня циліндрична насадка, або насадка Борда (рис. 3.8, б). Якщо до отвору з середини резервуару підключити коротку трубку довжиною не менше $(3,5 - 4)d$, то така насадка теж збільшує пропускну здатність. За даними дослідів, для внутрішньої циліндричної насадки $\varphi = \mu = 0,71$.

Конічно збіжна насадка (конфузорна насадка) (рис. 3.8, в). У таких насадках рідина при виході також стискається, але менше.

Коефіцієнти φ і μ цих насадок залежать від кута конусного θ . Найвигіднішим кутом є кут $\theta = 13^{\circ}24'$, при якому $\varphi = 0,97$, $\mu = 0,95$, $E = 0,98$.

Конічно розхідні насадки (дифузорні насадки) (рис. 3.8, г). У насадках цього типу в зоні стискання струменя виникає значно більше розрідження, ніж у циліндричних насадках, що сприяє збільшенню швидкості в стиснутому перерізі внаслідок підсмоктування. Найвигіднішим вважається кут $\theta = 8^{\circ}$.

Коефіцієнти φ і μ змінюються в межах 0,45 – 0,5, що свідчить про відносно невеликі швидкості на виході.

Коноїдальні насадки (рис. 3.8, д). При таких насадках завдяки плавним умовам входу в насадку зменшують втрати енергії при виході, що сприяє збільшенню пропускної здатності насадок.

Дослідами підтверджено, що $\varphi = \mu = 0,96 - 0,99$.

При витіканні рідини через будь-які насадки, як і при витіканні через отвір, при використанні рівняння Д. Бернуллі для перерізів 1–1 і 2–2 (рис. 3.9) можна одержати розрахункові формули швидкості й витрати, які так само, як і при витіканні з отвору застосовуємо формули (3.30) та (3.31) з лабораторної роботи № 4, де:

H – напір над центром ваги насадка;

ω – площа вихідного перерізу насадка;

μ – коефіцієнт витрати насадка;

φ – коефіцієнт швидкості насадка.

Якщо насадок визначається для вихідного отвору, коли $E = 1$, то за формулою (3.32) коефіцієнт витрати насадка дорівнює коефіцієнту швидкості:

$$\mu = E \cdot \varphi = 1 \cdot \varphi = \varphi. \quad (3.46)$$

Якщо в перерізі С–С швидкість більша, ніж на вихідному перерізі насадка ($V_c > V$), то за рівнянням Д. Бернуллі тиск у стислому перерізі буде менший від атмосферного ($P < P_{атм}$), тобто в стиснутому перерізі утворюється вакуум. Якщо до насадки в стиснутому перерізі підключити вакуум, то висота піднятої рідини $h_{вак} = 0,75H$ (рис. 3.9).

Утворення вакууму сприяє додатковому підсмоктуванню рідини з напірного резервуара. Пропускна здатність насадки (витрата) більше пропускної здатності отвору того ж розміру при однаковому напорі.

Якщо трубка вакуумметра буде коротшою, ніж $h_{вак}$, то насадок почне “підсмоктувати” рідину з вакуумметра. На цьому явищі заснована дія водоструминних насосів.

При напорах, більших за граничні (для води $H_{пред} \approx 13$ м), в циліндричних насадках відбувається зрив вакууму. При цьому струмінь відривається від внутрішньої поверхні насадка і витікання проходить з малого отвору в тонкій стінці. У такому випадку насадок не виправдовує свого значення.

На практиці приймають вакуумметричну висоту не більшу ніж 8 м, тоді $H_{пред} \leq 10,7$ м.

Склад роботи

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів витрати, швидкості, стисання та опору при витіканні рідини через насадок і порівняння цих коефіцієнтів з довідковими.

2. Вимірювання величини вакууму в зовнішньому циліндричному насадку, спостереження за зривом вакууму.

5. За допомогою вакуумметра вимірюємо вакуум.

6. Для спостереження явища «зриву вакууму» знімають гумову трубку зі штуцера насадка 3 таким чином з'єднують зону пониженого тиску з атмосферою, що приводить до зриву вакууму. Для відновлення вакууму надівають гумову трубку на штуцер і на деякий час перекривають вихідний отвір насадка.

При проведенні дослідів слід звертати увагу на форму, характер, дальність струменя, який витікає з насадка, а також при зриві вакууму.

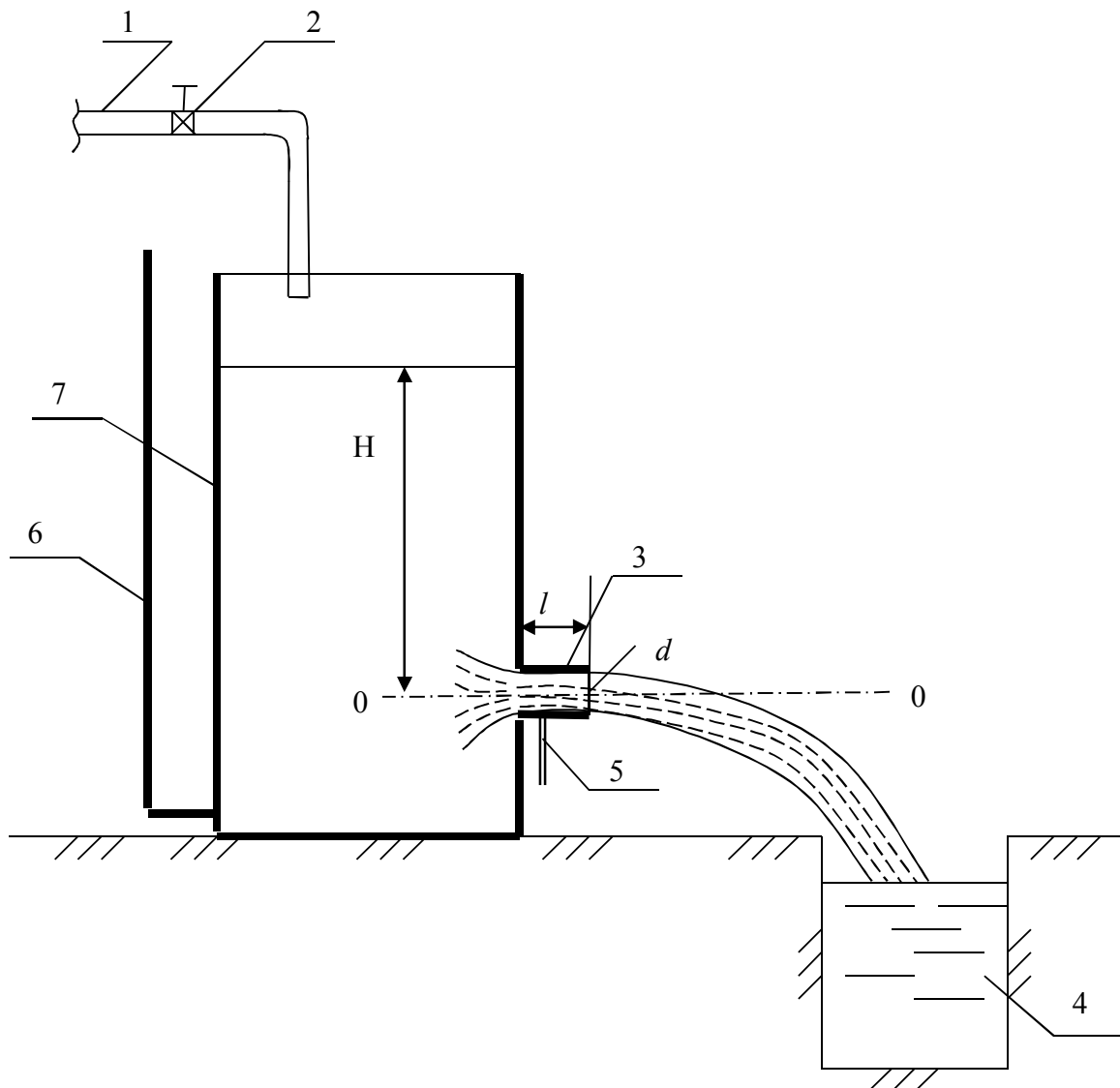


Рисунок 3.10 – Схема експериментальної установки для лабораторної роботи № 5:

1 – труба; 2 – вентиль; 3 – насадок; 4 – вимірний резервуар; 5 – штуцер для приєднання вакуумметра; 6 – н'єзометр; 7 – напірний резервуар

Обчислення дослідних даних

1. Визначаємо площину перерізу насадка на вході ω_1 та на виході ω_2 :

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \text{ і } \omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}, \quad (3.47)$$

де d_1 – діаметр насадка на вході;
 d_2 – діаметр насадка на виході.

2. За даними вимірів обчислюємо витрату насадка за формулою

$$Q = \frac{W}{T}.$$

3. За рівнянням знаходимо коефіцієнт витрати насадка:

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}. \quad (3.48)$$

4. Визначаємо відношення $h_{\text{вак}}/H$ і обчислюємо величину вакууму на вході в насадок:

$$P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}. \quad (3.49)$$

5. Отримані з дослідів значення φ , μ , ξ та $h_{\text{вак}}/H$ зіставляємо з довідковими.

Усі результати вимірювань і обчислення записуємо до лабораторного журналу (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Журнал лабораторної роботи № 5

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик
1	2	3
1	Довжина насадка l , см	
2	Діаметр насадки на вході d_1 , мм на виході d_2 , мм	
3	Площа перерізу насадка: на вході $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$, см ² на виході $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$, см ²	
4	Напір, під яким відбувається витікання H_0 , м	
5	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час W , л	
6	Тривалість витікання T , с	
7	Витрата $Q = \frac{W}{T}$, см ³ /с	
8	Коефіцієнт витрати насадка $\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$	
9	Середня швидкість у швидкісному перерізі насадка $V = \frac{Q}{\omega_2}$, см/с	

Продовження таблиці 3.5

1	2	3
10	Коефіцієнт швидкості насадка $\mu = \frac{V}{\sqrt{2gH}}$	
11	Значення вакууму на вході в насадок $h_{\text{вак}}$, см	
12	Відношення $h_{\text{вак}} / H$	
13	Вакуумметричний тиск на вході в насадок $P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}$	
14	Висновки:	

«_____» _____ 20__ р.

(підпис студента)

Контрольні запитання

1. Який отвір називають малим?
2. В яких умовах струмінь буде знаходитися в умовах неповного стискання, не зовсім стиснутого, зовсім стиснутого при витіканні з насадка?
3. Які числові значення мають коефіцієнти μ , φ , E і ξ при витіканні з насадків різної форми?
4. Який фізичний зміст коефіцієнтів μ та φ ?
5. Що таке коефіцієнт стискання струменя?
6. Який зв'язок існує між коефіцієнтом швидкості й коефіцієнтом опору?
7. Як визначають коефіцієнт витрати через коефіцієнти E та φ при витікання рідини через насадки?

4 САМОСТІЙНЕ ВИВЧЕННЯ ДИСЦИПЛІНИ

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1 ГІДРОАЕРОСТАТИКА

Тема 1 Основні рівняння гідроаеростатики

Визначення рідин та газів. Реальні та ідеальні рідини. Основні фізичні властивості рідин та газів: густина, стисливість, розширення, текучість, в'язкість. Розчинення газів у рідинах. Кипіння. Кавітація.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення рідини. Якими фізичними властивостями вона володіє?
2. Наведіть визначення питомої маси та питомої ваги рідини. Який між ними взаємозв'язок?
3. Дайте характеристику таких фізичних властивостей рідини як стиснення та температурне розширення.
4. Дайте визначення в'язкості. Яким чином вона визначається?

Тема 2 Сили, що діють на рідини і гази. Гідростатичний тиск та його властивості

Предмет статички рідин та газів. Сили, що діють на рідини і гази. Гідростатичний тиск та його властивості. Тензор напруження. Різновиди гідростатичного тиску. Диференційне рівняння спокою рідини (рівняння Ейлера).

Питання для самоконтролю

1. Назвіть сили, які діють на рідину у стані спокою.
2. Дайте визначення гідростатичного тиску та його властивостей.
3. Наведіть алгоритм визначення диференційного рівняння рівноваги рідини.
4. Дайте визначення закону Паскаля, його практичне застосування.
5. Які ви знає види тиску в рідині? Наведіть основні типи приладів для визначення тиску.
6. У чому полягає закон сполучених посудин? Його практичне застосування.
7. Дайте визначення гідростатичного та п'єзометричного напорів.
8. Дайте визначення питомої потенційної енергії рідини у стані спокою.

Тема 3 Основне рівняння гідростатики

Основне рівняння гідростатики. Геометрична та фізична його інтерпретація. Відносний спокій рідин та газів. Поверхні та лінії рівноваги тиску.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть методику отримання основного рівняння гідростатики.
2. У чому полягає фізична та геометрична інтерпретація основного

рівняння гідростатики?

3. Наведіть основні види поверхонь та ліній рівноваги тиску.

Тема 4 Сила тиску рідин та газів на плоску поверхню

Сила тиску рідин та газів на плоску поверхню. Центр тиску та його координата. Епюри та призми гідростатичного тиску. Принцип дії простих гідравлічних машин.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення епюри гідростатичного тиску. Наведіть епюри гідростатичного тиску у резервуарах з різними видами тиску.

2. Наведіть схему та алгоритм визначення сили тиску на плоскі стінки і дно резервуарів.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2 ГІДРОДИНАМІКА ТА ГІДРАВЛІЧНІ МАШИНИ

Тема 5 Гідравлічні машини

Призначення, принцип дії і області застосування насосів різних типів. Параметричні характеристики насосів. Напір насосної установки. Сумісна робота насосів і водоводів. Регулювання роботи гідравлічних і аеродинамічних машин.

Питання для самоконтролю

1. Призначення гідравлічних і аеродинамічних машин у системах водопостачання, каналізації.

2. Яке обладнання є гідравлічними машинами, його основна роль в системах водопостачання та водовідведення?

3. За якими ознаками класифікують насоси?

4. Назвіть класифікацію відцентрових насосів.

5. Приведіть принципову схему та принцип дії відцентрового насоса.

6. Формула визначення корисної потужності насоса.

7. Дайте визначення коефіцієнтом корисної дії.

8. Яка характеристика насоса є головною?

9. Наведіть залежність та графічне відображення сумісної роботи насоса та водоводу.

10. Паралельна робота кількох однотипних насосів на два водоводи.

11. Послідовна робота кількох однотипних насосів на два водоводи.

12. Наведіть формули подібності для продуктивності, напору і кількості обертів насоса.

13. Вплив частоти обертання робочого колеса на характеристики відцентрового насоса.

14. Яким чином можливо регулювати основні параметри роботи відцентрового насоса?

Тема 6 Основи гідродинаміки

Предмет гідродинаміки. Усталений та неусталений рух рідин і газів. Струминкова модель. Елементи і параметри потоку: лінія течії, трубка течії, елементарний струмінь, потік, живий переріз, витрата, середня швидкість.

Рівняння нерозривності (суцільності) рідини і газу за одномірною моделлю.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення гідродинаміки та основних гідравлічних параметрів потоку рідини, яка рухається.
2. Назвіть основні елементи потоку, дайте їх визначення.
3. Наведіть алгоритм визначення рівняння нерозривності руху рідини для елементарного струменя і для потоку рідини.

Тема 7 Рівняння Бернуллі для нев'язкого та в'язкого елементарного струменя. Геометрична та фізична інтерпретація цього рівняння

Рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини і газу. Гідравлічна та фізична інтерпретація цього рівняння. Поняття про п'єзометричний та гідравлічний ухили.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть диференціальні рівняння руху ідеальної рідини. Що отримують в результаті інтегрування цих рівнянь?
2. Наведіть геометричну схему рівняння Бернуллі для елементарного струменя потоку та назвіть його основні складові.
3. Наведіть геометричну схему рівняння Бернуллі потоку реальної рідини та назвіть його основні складові.
4. Дайте визначення п'єзометричного та гідравлічного ухилів. Наведіть формули для їх визначення.
5. Наведіть приклади практичного застосування рівняння Бернуллі. За якою послідовністю вирішуються задачі із застосування цього рівняння?

Тема 8 Режими руху рідини

Пульсація швидкостей і тисків у турбулентному потоці. Осереднені швидкості в точках живих перерізів турбулентного потоку. Миттєві швидкості і тиски. Число Рейнольдса. Критичне значення числа Рейнольдса. Фізичний зміст числа Рейнольдса.

Питання для самоконтролю

1. Які ви знаєте режими руху рідини? Яким чином можна їх визначити?
2. Що таке критичні швидкості? Наведіть схему лабораторної установки для визначення режимів руху рідини.

Тема 9 Основи динаміки газів

Рівняння руху рідин з малими швидкостями. Рівняння руху газів. Що стискаються. Взаємодія між газом, що рухається, та тілом за наявності в'язкості.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть рівняння руху рідин з малими швидкостями.
2. Наведіть рівняння руху газів.
3. Яка взаємодія існує між газом, що рухається, та тілом за наявності в'язкості?

Тема 10 Гідравлічний розрахунок трубопроводів

Усталений рух рідини і газу в напірних трубопроводах. Класифікація трубопроводів та їх з'єднань. Поняття короткого, довгого трубопроводу. Основні залежності для розрахунків коротких трубопроводів.

Основні залежності для розрахунків довгих трубопроводів з перемінними витратами (масою рідини і газу) уздовж трубопроводу. Розподільні трубопроводи. Трубопроводи – збирачі.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення та назвіть основне призначення магістральних і розгалужених мережі труб.
2. Наведіть класифікацію трубопроводів залежно від матеріалу труб і від характеру роздачі рідини.
3. Назвіть типи задач для гідравлічного розрахунку трубопроводів.
4. Наведіть основні розрахункові формули під час руху рідини в напірних трубопроводах
5. У чому полягає розрахунок простого трубопроводу? Наведіть типи задач з його розрахунку.
6. Дайте визначення питомого опору, опору ділянки трубопроводу.
7. У чому полягає розрахунок самопливного, сифонного трубопроводів та всмоктуючого трубопроводу насосу?
8. Яке поєднання трубопроводів називається послідовним?
9. Яке поєднання трубопроводів називається паралельним?
10. Дайте визначення вузлової, шляхової, транзитної та розрахункової витрат.
11. Наведіть визначення та послідовність розрахунку дірчатого трубопроводу.
12. У чому полягає економічний розрахунок трубопроводу? Що таке найвигідніший діаметр?

Тема 11 Втрати напору в пожежних рукавах

Гідравлічні опори, їх фізична природа і класифікація. Втрати напору. Види втрат напору. Формула Дарсі–Вейсбаха. Модель турбулентного потоку у трубах. Пристінний ламінарний і турбулентний шар. Гідравлічно гладкі та гідравлічно шорсткі поверхні. Розподіл осереднених швидкостей і дотичних

напружень у живих перерізах турбулентних потоків.

Питання для самоконтролю

1. Охарактеризуйте причини виникнення гідравлічних опорів під час руху рідини. Дайте визначення та основні формули для визначення втрат напору за довжиною.

2. Від чого залежать місцеві гідравлічні опори та за якою формулою визначаються місцеві втрати напору?

3. Наведіть основні види місцевих опорів та величину відповідного коефіцієнту місцевого опору.

4. Як впливає в'язкість рідини за малих чисел Рейнольдса на визначення коефіцієнту місцевого опору?

Тема 12 Неусталений рух реальної рідини. Гідравлічний удар

Гідравлічний удар в трубопроводах. Коливання тиску. Формула М.Є.Жуковського. Повний та неповний гідравлічний удар. Заходи попередження гідравлічного удару. Гідравлічний таран.

Питання для самоконтролю

1. Що таке гідравлічний удар?

2. Назвіть причини виникнення гідравлічного удару.

3. Дайте визначення позитивного і негативного гідравлічного удару.

4. У чому полягає теорія гідравлічного удару Жуковського?

5. Що таке фаза ударної хвилі?

6. Що таке прямий і непрямий гідравлічний удар?

7. Як визначити максимальне підвищення тиску при прямому і непрямому ударі?

8. Назвіть заходи з локалізації явища гідравлічного удару у водопровідних трубах і на насосних станціях.

9. У чому полягає дія гідравлічного тарану?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3 ВИТІКАННЯ РІДИНИ З ОТВОРІВ ТА НАСАДКІВ

Тема 13 Розрахунок витікання рідини через отвори та насадки

Усталений рух рідини і газу через отвори і насадки. Використання отворів і насадків в технічних системах і механізмах. Поняття малого та великого отвору. Пропускна здатність отворів при витіканні рідини в газове середовище. Пропускна здатність отворів при витіканні рідини і рідину. Коефіцієнти стиснення, швидкості і витрати.

Класифікація насадків. Пропускна здатність насадків при витіканні рідини в газове середовище та рідини в рідину. Вакуум в насадках. Коефіцієнти швидкості і витрати.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть класифікацію отворів.
2. Дайте визначення явища інверсії. Що таке досконале і недосконале стиснення?
3. Наведіть схеми та дайте до них пояснення вільного, підтопленого та затопленого отворів.
4. Наведіть схему витікання рідини з малих отворів при постійному напорі.
5. Наведіть схему витікання рідини з великих отворів при постійному рівні рідини в резервуарі.
6. Наведіть схему витікання рідини з отворів при змінному напорі.
7. Дайте класифікацію насадків, назвіть галузі їх використання.

Тема 14 Розрахунок гідравлічних струменів, методи розпилення струменів

Вільні гідравлічні струмені, їх розрахунок. Визначення висоти вертикального вільного струменя. Гранична крива розповсюдження вільного гідравлічного струменя.

Питання для самоконтролю

1. Дайте визначення вільного струменя.
2. Наведіть частини, з яких складається незатоплений струмінь.
3. Як визначити висоту вертикального струменя?
4. Наведіть схему граничної кривої розповсюдження струменя.
5. Наведіть схему руху рідини в затопленому струмені.

Завданням на контрольну роботу передбачається складання відповідей на контрольні питання, номери яких вказані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти контрольних запитань

Номер розділу	Номери варіантів (остання цифра номера залікової книжки)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	1	3	2	4	–	–	–	–	–	–
2	–	–	–	–	8	7	5	4	3	1
3	1	2	3	–	–	–	–	–	–	–
4	–	–	–	1	2	–	–	–	–	–
5	–	–	–	–	–	1	14	8	12	11
6	1	2	3	–	–	–	–	–	–	–
7	–	–	–	5	3	1	2	4	–	–
8	–	–	–	–	–	–	–	–	1	2
9	3	2	1	–	–	–	–	–	–	–
10	–	–	–	1	3	4	8	9	11	12
11	4	1	2	3	–	–	–	–	–	–
12	–	–	–	–	1	4	8	5	3	9
13	7	4	5	6	1	2	3	–	–	–
14	–	–	–	–	–	–	–	5	2	4

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ : Вища школа, 2002. – 358 с.
2. Krasowski E. Hydraulics. Hydraulics machines / E. Krasowski, I. Nikolenko, J. Gliński, A. Dashchenko, S. Sosnowski. – Lublin: Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2011. – 350 p.
3. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу / І. І. Науменко. – Рівне : Видавництво РДТУ, 2000. – 528 с.
4. Науменко І. І. Гідравліка / І. І. Науменко. – Рівне : Видавництво НУВГП, 2005. – 360 с.
5. Левицький Б. Ф. Гідравліка. Загальний курс / Б.Ф. Левицький. – Львів : Світ, 1994. – 298 с.
6. Гідравлічні і аеродинамічні машини / О. М. Романюк, Г. П. Вербицький, М. І. Колотило, В. Д. Колотило, Ф. М. Клепіков. – Кіровоград. – 1997. – 176 с.
7. Колотило М. І. Насоси, повітродувки, компресори : навч. посібник для вузів / М. І. Колотило. – Харків : ХДТУБА. – 1997. – 128 с.
8. Константинов Ю. М. Задачник з гідравліки : навч. посібник / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ : КНУБА, 2008. – 92 с.
9. Штенлихт Д. В. Гидравлика / Д. В. Штенлихт. – М. : Энергоиздат, 1991. – 740 с.
10. Константинов Ю. М. Гідравліка / Ю. М. Константинов. – Київ : Вища школа, 1988. – 320 с.

ДОДАТОК А
Залежність щільності води від температури

Температура, °C	Щільність, кг/м ³	Температура, °C	Щільність, кг/м ³	Температура, °C	Щільність, кг/м ³
-10	998,15	7	999,93	25	997,07
-9	998,43	8	999,88	26	996,81
-8	998,69	10	999,73	27	996,52
-7	998,92	11	999,63	28	996,22
-6	999,12	12	999,52	29	995,92
-5	999,30	13	999,40	30	995,61
-4	999,45	14	999,27	31	995,21
-3	999,58	15	999,13	32	994,79
-2	999,70	16	998,97	33	994,36
-1	999,79	17	998,80	34	993,94
0	999,87	18	998,62	35	993,50
1	999,93	19	998,43	40	991,18
2	999,97	20	998,23	50	988,04
3	999,99	21	998,02	60	983,18
4	1000,0	22	997,80	70	977,71
5	999,99	23	997,57	80	972,69
6	999,97	24	997,32	90	965,34

ДОДАТОК Б
Щільність крапельних рідин ρ (за температури 20 °C)

Рідина	ρ , кг/м ³	Рідина	ρ , кг/м ³
Анілін	945	Масло мінеральне	877–892
Бензол	876–880	Нафта	760–900
Бензин авіаційний	739–780	Ртуть	13550
Бітум рідкий	1050	Спирт етиловий	790
Вода прісна	998,2	Хлористий натрій (26%-вий розчин)	1100
Вода морська	1002–1030	Штукатурні розчини	2000–2500
Масло касторове	970	Ефір етиловий	715–719
Масло льняне	930		

ДОДАТОК В

Таблиця В.1 – Значення коефіцієнта об'ємного стиснення для деяких рідин

Рідина	Коефіцієнт об'ємного стиснення, β_p , $\text{см}^2/\text{Н}$	Рідина	Коефіцієнт об'ємного стиснення, β_p , $\text{см}^2/\text{Н}$
Вода	0,00000525–0,00000475	Гліцерин	0,0000025
Алкоголь	0,0000077	Гас	0,0000059
Ефір	0,0000010	Нафта	0,0000074
Ртуть	0,0000003	Дизельне паливо	0,0000064
Бензин	0,0000092		

Таблиця В.2 – Коефіцієнт об'ємного розширення деяких рідин

Рідина	β_t , $1/^\circ\text{C}$	Рідина	β_t , $1/^\circ\text{C}$
Вода	0,00015	Нафта	0,0006
Гліцерин	0,0005	Ртуть	0,00018
Спирт	0,0011	Масло АМГ-10	0,0008

Таблиця В.3 – Значення коефіцієнта об'ємного стиснення води, β_p , $\text{см}^2/\text{Н}$

Температура, $^\circ\text{C}$	Тиск, p , $\text{Н}/\text{см}^2$				
	50	100	200	390	780
0	0,0000054	0,00000537	0,00000531	0,00000523	0,00000515
5	0,00000529	0,00000523	0,00000518	0,00000508	0,00000493
10	0,00000523	0,00000518	0,00000508	0,00000498	0,00000481
15	0,00000518	0,0000051	0,00000503	0,00000488	0,0000047
20	0,00000515	0,00000505	0,00000495	0,00000481	0,0000046

Таблиця В.4 – Значення модуля пружності води, E , $\text{Н}/\text{см}^2$

Температура, $^\circ\text{C}$	Тиск, p , $\text{Н}/\text{см}^2$				
	50	100	200	390	780
0	185400	186400	188400	191300	197200
5	189300	191300	193300	197200	203100
10	191300	193300	197200	201100	208000
15	193300	196200	199100	205000	212900
20	194200	198200	202100	208000	217800

Таблиця В.5 – Значення коефіцієнта температурного розширення води, β_t , $1/^\circ\text{C}$

Тиск, p , $\text{Н}/\text{см}^2$	Температура, t , $^\circ\text{C}$				
	1–10	10–20	40–50	60–70	99–100
10	0,000014	0,00015	0,000422	0,000556	0,000719
980	0,000043	0,000165	0,000422	0,000548	0,000714
1960	0,000072	0,000183	0,000426	0,000539	–
4900	0,000149	0,000236	0,000429	0,000523	0,000661
8830	0,000229	0,000289	0,000437	0,000514	0,000661

Примітка. Середнє значення коефіцієнту температурного розширення води $\beta_t = 0,000208 \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1 – Кінематична в'язкість деяких рідин (при температурі 20 °С)

Рідина	$\nu \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Рідина	$\nu \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
Бензин	0,83–0,93	Масло льняне	55
Вода прісна	1,01	Масло мінеральне	313–1450
Гліцерин безводний	4,1	Ртуть	0,11
Дизельне пальне	5,0	Нафта	8,1–9,3
Гас	2–3	Ртуть	0,11
Фарбові розчини (готові до використання)	90–120	Спирт етиловий безводний	1,51
Масло касторове	1002	Хлористий натрій (26% – вий розчин)	1,53

Таблиця Г.2 – Кінематична в'язкість прісної води

Температура, °С	Коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\nu, \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Температура, °С	Коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\nu, \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
0	0,0179	25	0,0090
1	0,0173	30	0,0080
2	0,0167	35	0,0072
3	0,0162	40	0,0065
4	0,0157	45	0,0060
5	0,0152	50	0,0055
7	0,0143	60	0,0048
10	0,0131	70	0,0042
12	0,0124	80	0,0037
15	0,0114	90	0,0033
17	0,0109	100	0,0029
20	0,0101		

ДОДАТОК Д

Щільність і кінематична в'язкість деяких газів (р = 100 кПа)

Газ	Температура t °С	Щільність $\rho, \text{ кг/м}^3$	Кінематична в'язкість $\nu \times 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$
Повітря	15	1,21	14,5
Водень	15	0,085	94,5
Кисень	15	1,34	1,4
Вуглекислий газ	15	1,84	7,2

ДОДАТОК Е

Поверхнєве тяжіння рідин (за температури 20 °С)

Рідина	σ , Н/м	Рідина	σ , Н/м
Бензол	0,029	Нафта	0,025
Вода	0,073	Ртуть	0,49
Гліцерин	0,065	Спирт	0,0225
Мильна вода	0,04		

ДОДАТОК Ж

Основні співвідношення одиниць виміру тиску

Найменування	кг/см ²	н/м ²
Фізична атмосфера	1,033	101324
Технічна атмосфера	1,0	98066,5
Міліметр ртутного стовпчика	0,00136	133,32
Міліметр водяного стовпа	0,0001	9,80665

При практичних розрахунках приймають:

$$1 \text{ технічна атмосфера} = 1 \text{ кг/см}^2 = 9,81 \text{ н/см}^2$$

ДОДАТОК И

Питома вага деяких рідин γ при 293 °К (20 °С)

Назва	кг/м ³	н/м ³
Вода прісна	998,2	9789
Вода морська	1020	10020
Ртуть	13547	132850
Спирт етиловий безводний	789,3	7740
Нафта важка	928,0	9100
Бензин автомобільний	736	7218
Солярка	846	8287
Гліцерин	1250	12260

ДОДАТОК К

Тиск насичених парів води залежно від температури

Температура води, °С	–30	–20	–10	0	10	20	30	40	50
Тиск парів, Па	50,5	125,6	279,6	612	1179	2335	4240	7360	12320

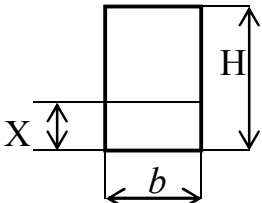
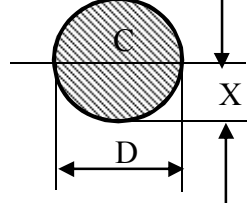
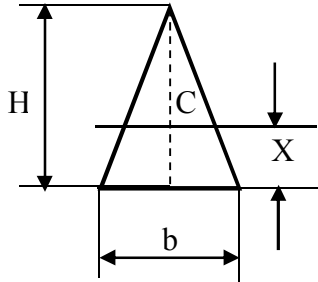
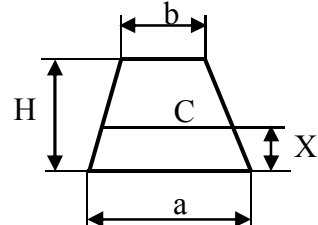
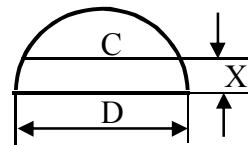
ДОДАТОК Л

Залежність атмосферного тиску від висоти розташування місцевості

Висота над рівнем моря, м	0	100	200	300	400	500	600	800	1000	1500	2000
Атмосферний тиск, кПа	101	100	99	97,5	96,5	95	94	92	90	84,5	80

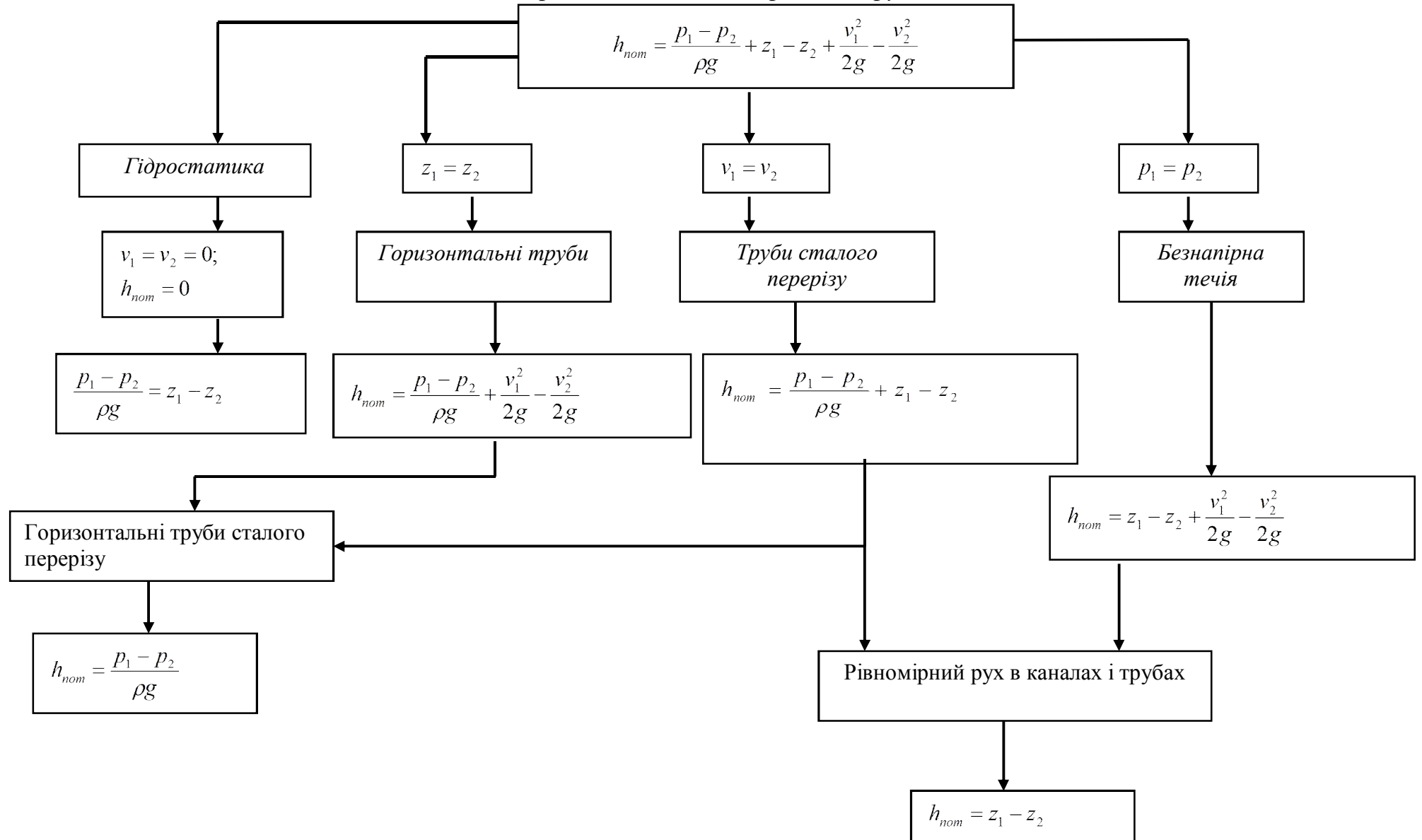
ДОДАТОК М

Розташування центра ваги плоских фігур і формули моментів інерції відносно осі, яка проходить через центр ваги

	$x = \frac{H}{2} \quad I_o = \frac{bH^3}{12}$
	$x = \frac{D}{2} \quad I_o = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{D^4}{20,4}$
	$x = \frac{H}{3}; \quad I_o = \frac{bH^3}{36}$
	$x = \frac{H}{3}; \quad \frac{2b+a}{a+b}$ $I_o = \frac{H^3(a^2 + 4ab + b^2)}{36(a+b)}$
	$x = 0,424; \quad r = \frac{D}{4,71};$ $I_o = \frac{D^4 145,4}{4,71^3}$

ДОДАТОК Н

Алгоритм визначення втрат напору



ДОДАТОК П

Зв'язок між коефіцієнтом гідравлічного тертя λ та коефіцієнтом Шезі C

$C, m^{1/2}/c$	λ	$C, m^{1/2}/c$	λ	$C, m^{1/2}/c$	λ
10	0,785	35	0,064	60	0,022
15	0,345	40	0,049	70	0,016
20	0,196	45	0,039	80	0,012
25	0,125	50	0,031	90	0,010
30	0,087	55	0,026	100	0,008

ДОДАТОК Р

Значення коефіцієнта гідравлічного тертя λ при русі повітря в нових трубах з покрівельної сталі (за Є. К. Громцевим)

Діаметр труб d, мм	Коефіцієнт λ при швидкості потоку повітря v, м/с						
	10	15	20	25	30	35	40
100	0,0204	0,0187	0,0177	0,0170	0,0164	0,0159	0,0156
110	0,0200	0,0183	0,0173	0,0165	0,0160	0,0155	0,0152
120	0,0195	0,0179	0,0179	0,0162	0,0157	0,0153	0,0149
130	0,0192	0,0176	0,0165	0,0159	0,0154	0,0149	0,0146
140	0,0188	0,0172	0,0163	0,0155	0,0150	0,0146	0,0143
150	0,0185	0,0170	0,0160	0,0153	0,0148	0,0144	0,0140
160	0,0182	0,0166	0,0157	0,0150	0,0145	0,0142	0,0138
170	0,0180	0,0165	0,0155	0,0148	0,0143	0,0140	0,0137
180	0,0177	0,0162	0,0153	0,0146	0,0141	0,0138	0,0135
190	0,0175	0,0161	0,0151	0,0145	0,0140	0,0136	0,0133
200	0,0172	0,0162	0,0149	0,0143	0,0138	0,0134	0,0131
210	0,0170	0,0157	0,0148	0,0141	0,0137	0,0133	0,0130
220	0,0168	0,0154	0,0145	0,0139	0,0135	0,0131	0,0128
230	0,0166	0,0152	0,0144	0,0138	0,0133	0,0130	0,0127
240	0,0164	0,0151	0,0142	0,0136	0,0132	0,0128	0,0125
250	0,0163	0,0149	0,0141	0,0135	0,0131	0,0127	0,0124
260	0,0162	0,0148	0,0140	0,0134	0,0130	0,0126	0,0123

ДОДАТОК С

Значення λ , розраховані за формулою $\lambda = 0,021 / d^{0,3}$

d, м	λ	d, м	λ	d, м	λ
1	0,0210	1,75	0,0178	3	0,0151
1,25	0,0196	2	0,0171	4	0,0139
1,5	0,0186	2,5	0,0161	5	0,0116

Додаток Т

Значення коефіцієнту форми А та еквівалентного діаметру трубопроводів

Форма живого перерізу	$d_{\text{екв}}$	А
Коло діаметром d	d	64
Квадрат зі стороною a	a	57
Рівносторонній трикутник зі стороною a	$0,58a$	53
Кільцевий простір шириною a	$2a$	96
Прямокутник зі сторонами a та b :		
$a/b \approx 0$	$2a$	96
$a/b = 0,25$	$1,6a$	73
$a/b = 0,5$	$1,3a$	62

Виробничо-практичне видання

Методичні рекомендації
для проведення практичних та лабораторних занять, виконання розрахунково–
графічного завдання та самостійної роботи з дисципліни

«ГІДРАВЛІКА»

*((для студентів 1–2 курсів денної та заочної форм навчання спеціальності
263 – Цивільна безпека освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»
та спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія освітньо-
кваліфікаційного рівня «спеціаліст»))*

Укладач **ШЕВЧЕНКО** Тамара Олександрівна

Відповідальний за випуск *Т. О. Шевченко*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *Т. О. Шевченко*

План 2017, поз. 110М

Підп. до друку 25.09.2018. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 3,0.

Тираж 50 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.